

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інженерно-фізичний факультет

Кафедра ливарного виробництва чорних та кольорових металів

«На правах рукопису»  
УДК 621.74

До захисту допущено  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ М.М. Ямшинський  
(підпис) (ініціали, прізвище)  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**  
**зі спеціальності 136 Металургія**

на тему: «Литі композиційні системи мідний сплав - сталь, які працюють в умовах підвищених навантажень і абразивного зношування»

Виконав: студент II курсу, групи ФЛ-81мп

Івжич Денис Олегович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Науковий керівник

д.т.н. проф. Затуловський А.С.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Консультант з економічно-  
ганізаційної частини

к.е.н., ст. викл. Нараєвський С.В.  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Консультант  
з нормоконтролю

к.т.н., доц. Федоров Г.Є.  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Рецензент

\_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 р.



## 7. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання дав	завдання прийняв
Економічно-організаційна частина	Нараєвський С.В., ст.викл.		
Нормоконтроль	Федоров Г.Є., доц.		

8. Дата видачі завдання: “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Переддипломна практика	02.09...27.10.2019р.	
2	Опрацювання та аналіз літератури за темою дослідження	02.09...15.11.2019р.	
3	Розроблення методики дослідження	02.09...27.10.2019р.	
4	Планування та проведення експериментів	02.09...27.10.2019р.	
5	Аналіз результатів експериментів	16.11...25.11.2019р.	
6	Розрахунок економічно-організаційних показників	26.11...30.11.2019р.	
7	Аналіз стану охорони праці на робочому місці	01.12...02.12.2019р.	
8	Підготовка та оформлення ілюстративної частини магістерської дисертації	03.12...04.12.2019р.	
9	Оформлення магістерської дисертації	05.12...06.12.2019р.	
10	Подання магістерської дисертації до захисту	07.12.2019р.	
11	Рецензування магістерської дисертації	07.12...09.12.2019р.	
12	Захист магістерської дисертації	19.12.2019р.	

Студент

(підпис)

Науковий керівник

(підпис)

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Івжич Д.О.

Затуловський А.С.

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 122 с., 45 рис., 15 табл., 91 посилань.

Об'єкт досліджень - литі композиційні матеріали (ЛКМ), виготовлені методом твердо-рідкофазного суміщення, на основі матриць з мідних сплавів, армованих дискретними високомодульними сталевими включеннями (гранулами, дробом). ЛКМ призначені для використання в високонавантажених вузлах тертя технологічного устаткування, що працюють у важких умовах сухого і граничного тертя ковзання при впливі абразивних частинок.

Мета роботи - створення фізико-технологічних основ оптимізації формування заготовок з макрогоетерогенних литих металокомпозитів.

Результати досліджень - в результаті лабораторних досліджень визначені переваги макрогоетерогенного антифрикційного ЛКМ, що має абразивну стійкість в умовах різного типу впливу дисперсних абразивів від 1,5 до 7 разів вищу, ніж у стандартних антифрикційних кольорових сплавів - бронз і латуней. Отримані експериментальні дані і розроблені на їх основі рекомендації дозволяють здійснити промислове застосування зносостійких ЛКМ мідь - сталь в високонавантажених вузлах тертя ковзання, що працюють у важких умовах наявності абразивних частинок в зоні контакту поверхонь, що труться і ін. видів абразивного зношування.

Ступінь впровадження – лабораторні випробування, впровадження на підприємства України та закордону.

Галузі застосування – машинобудування, металургія, гірничо промисловість

Економічна ефективність – умовний економічний ефект становить 1052387 грн

ЛИТИЙ КОМПОЗИЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ, ФОРМУВАННЯ  
МАКРОГЕТЕРОГЕННОЇ СТРУКТУРИ ВИЛИВОК, АБРАЗИВНЕ  
ЗНОШУВАННЯ, ТОПОГРАФІЯ ПОВЕРХНІ ТЕРТЯ, ТРИБОЛОГІЯ  
ЗНОШУВАННЯ ЛКМ ПРИ ДІЇ АБРАЗИВНИХ ЧАСТИНОК.

## ABSTRACT

Master's Thesis: 122 pp., 45 Figs., 15 Tables, 91 References.

The object of research - cast composite materials (LFM), made by the method of solid-liquid phase combination, on the basis of matrices of copper alloys, reinforced with discrete high-modulus steel inclusions (granules, shot). LMCs are intended for use in high-load friction units of process equipment operating under severe conditions of dry and sliding friction under the influence of abrasive particles.

The purpose of the work is to create the physico-technological bases for optimizing the formation of blanks from macro-heterogeneous cast metal composites.

The results of the research - as a result of laboratory tests, the advantages of macro-heterogeneous antifriction paint, which has abrasive resistance under conditions of different type of impact of dispersed abrasives from 1.5 to 7 times higher than standard antifriction non-ferrous alloys - bronze and brass, are determined. The experimental data obtained and the recommendations developed on the basis of these allow the industrial application of wear-resistant LMW copper - steel in high-load sliding friction units operating under difficult conditions of the presence of abrasive particles in the contact area of friction surfaces and others. types of abrasive wear.

Degree of implementation - laboratory testing, implementation at enterprises of Ukraine and abroad.

Areas of application - mechanical engineering, metallurgy, mining

Economic efficiency - conditional economic effect is 1052387 UAH

MOLDING      COMPOSITION      MATERIAL,      MAKING      OF  
MACROGETEROGENIC STRUCTURE OF CASTING

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	9
1.1 ЛКМ мідь – сталь – перспективний антифрикційний матеріал для важко навантажених вузлів тертя, що працюють в умовах впливу абразивних частинок.....	9
1.2 Аналіз процесів абразивного зношування і методів випробування антифрикційних підшипникових матеріалів.....	19
2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	33
2.1 Об'єкти і методика досліджень.....	33
2.2 Дослідження структури ЛКМ.....	35
2.3 Характеристика випробуваних матеріалів.....	54
2.4 Залежність абразивного зношування від властивостей випробуваних матеріалів і природи абразивних частинок.....	58
2.5 Вплив умов впливу сипучої абразивної маси на знос випробуваних матеріалів.....	66
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	75
3.1 Особливості зношування матеріалів при наявності абразивних частинок в контакті, що труться(нежорсткозакріплені).....	75
3.2 Характеристика випробуваних матеріалів.....	75
3.3 Залежність абразивного зношування від властивостей випробуваних матеріалів і природи абразивних частинок.....	80
3.4 Вплив умов впливу абразивного прошарку на знос випробуваних матеріалів.....	83
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	94
4.1 Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві.....	94
5 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	96
5.1 Науково-технічна актуальність теми дослідження.....	96
6 СТАРТАП-ПРОЕКТ.....	104
ВИСНОВКИ.....	110
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	111
ДОДАТКИ.....	115

## ВСТУП

Науково-технічний прогрес сучасної техніки здійснюється на основі широкого застосування нових наукоємних технологій і матеріалів. Підвищені вимоги до рівня експлуатаційних характеристик матеріалів для екстремальних умов експлуатації більшості деталей, сьогодні і в недалекому майбутньому неможливо реалізувати за рахунок використання серійних сплавів і традиційних методів їх обробки: легування, модифікування, термічної обробки та ін. Оскільки в більшості випадків деталі машин, оснащення, інструменти виходять з ладу внаслідок руйнування контактних поверхонь тертя, розробка нових економноармуючих антифрикційних матеріалів з поліпшеними експлуатаційними характеристиками, для масових галузей промисловості є актуальною і важливою науково-технічною проблемою - особливо для деталей, що працюють в екстремальних умовах сухого або граничного тертя ковзання, підвищених температур, навантажень і швидкостей, абразивного зношування. Для України розробка і впровадження нових антифрикційних матеріалів, що складаються з недорогих і недефіцитних компонентів є гостроактуальною ще й з наступних причин: 1) недостатній обсяг розробок і застосування нових нетрадиційних високотносостойких трибоматеріалів; 2) відсутність власних природних родовищ і виробництв ряду кольорових металів, необхідних для отримання стандартних антифрикційних кольорових або легованих сплавів; 3) високі витрати на імпорт трибоматеріалів і запчастин.

Як показали дослідження і дослідно-промислові роботи, результати яких узгоджуються з висновками інших авторів, для виготовлення деталей з високими антифрикційними властивостями дуже перспективні литі композиційні матеріали (ЛКМ), порошкові металокомпозити, псевдосплави системи мідь-сталь, залізовуглецеві сплави, що містять мідні включення тощо. Композиційні матеріали (КМ) рекомендуються як ефективні замітники бронзи, латуні, бабітів, залізо-графітової кераміки, які працюють в парі зі сталлю.

Застосування ЛКМ мідь-сталь в високонавантажених вузлах тертя дозволяє підвищити довговічність трибосполучень в 1,5-5 разів, зменшити простой

устаткування, запобігти аварійним ситуаціям через передчасної відмови трибодеталей, економити дефіцитні і дорогі кольорові метали. Трибовироби з ЛКМ експлуатуються в вузлах тертя металургійного, гірничо видобувного, енергетичного, під'ємно-транспортного та ін. Устаткування, що працюють у важких умовах підвищених навантажень, температур, агресивного впливу абразивних частинок. Тому представляє безперечний науковий і практичний інтерес поряд з питаннями вдосконалення технологічних режимів отримання якісних щільних композитних виливків, вивчити характер і інтенсивність абразивного зношування ЛКМ мідь-сталь в присутності на фрикційної контакті твердих дисперсних частинок абразиву, як однієї з причин передчасної відмови обладнання. Особливо це стосується обладнання, що працює в умовах запиленості, безпосередньо руйнує контакту з абразивами при різних варіантах зовнішньосилового впливу абразиву при терті та ковзання: при наявності абразивних частинок в контакті, що труться (про часинки які закріплені не жорстко); при впливі жорстко закріплених частинок; в обсязі сипучого абразивного матеріалу. Ці дослідження ставили кінцевою метою пошук критеріального зв'язку зношування ЛКМ з їх складом і будовою, мікротвердістю фаз, режимами термічної обробки і структурою, для виявлення технологічних можливостей керувати процесами, здатними позитивно впливати на зносостійкість деталей машин. Попередній аналіз і узагальнення наявних даних показав, що вирішення зазначеного завдання сприятиме оптимізація температурно-часових режимів технологічного процесу отримання виробів з ЛКМ методом просочування і більш глибокі дослідження абразивостійкості макронеоднорідного композиту мідь-сталь.



## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 ЛКМ мідь - сталь - перспективний антифрикційний матеріал для важко навантажених вузлів тертя, що працюють в умовах впливу абразивних частинок

Абразивне зношування є найбільш поширеним і агресивним процесом, що обмежує довговічність надійної роботи трибосполучень, вузлів тертя. Загальна втрата матеріалу при експлуатації швидкозношуваних деталей, згідно з даними, наведеними в фундаментальному довіднику [1], розподіляється таким чином: на фізичний (моральний) знос припадає 15%; на поломки - 15%; інші 70% припадають на пошкодження поверхні, з яких 55% - знос, а 15% - корозія. Загалом знос виділяють 25% адгезійного зносу, а 30% - припадає на абразивний знос. Хоча існує думка, що до абразивного зносу може бути віднесено до 50% всіх проблем, пов'язаних із зносом [2].

Абразивне зношування - це руйнування деталі в результаті її взаємодії з твердими частинками при наявності відносної швидкості. Абразивного зношування піддаються вузли металургійного устаткування, деталі сільськогосподарських, дорожньо-будівельних, гірських, транспортних машин і транспортних пристроїв, металорізальних верстатів, шасі літаків, робочі колеса і направляючі апарати гідравлічних турбін, лопатки газових турбін, труби водяних економайзерів і парових котлів, бурильне обладнання нафтової і газової промисловості, підшипники змішувачів гребних валів судів і т.д. Тому проблема оптимізації матеріалу деталей, що зношуються з метою зниження їх адгезійного і особливо абразивного зносу важлива і актуальна для сучасного машинобудування. Одним з напрямків підвищення терміну служби рухливих сполучень машин є науково-обґрунтований вибір абразивостійких матеріалів, що володіють сприятливими, з точки зору зносостійкості, будовою, структурою, комплексом механічних характеристик.

Руйнування при механічному навантаженні має ряд особливостей, серед яких слід відзначити: 1) локалізацію руйнування в тонкому поверхневому шарі (~ 30-100

мкм); 2) високий градієнт напружень і деформацій; 3) термічне вплив зони контакту. Поліваріантність впливу різних чинників, пов'язаних з особливостями навантаження при сухому терті ковзання і одночасному впливі абразивних частинок з фізико-механічними властивостями і структурою матеріалу, відповідальних за контактну міцність, обумовлюють складність розробки універсальних критеріїв вибору трибоматеріалів для роботи в умовах контактного навантаження при взаємодії з абразивними частинками [3...5]. При одних і тих же хімічний склад і механічні властивості матеріали можуть значно відрізнятися по зносостійкості, що пов'язано з відмінностями їх структур. Наявність легко викришуються твердих або великих м'яких складових, схильних до схоплювання з матеріалом сполученої деталі, є дефектом структури матеріалів деталей, що труться. Наприклад, великі карбіди в чавунних виливках сприяють утворенню сітки термічних тріщин при роботі деталей. Складність завдання підбору раціональної структури матеріалу можна показати на підшипникових сплавах. Основна вимога до структури антифрикційних сплавів було вперше сформульовано в 1897р. Г. Шарпи. Згідно з правилом Шарпи, добре працюють антифрикційні сплави, повинні мати рівномірно розподілені в пластичній основі тверді зерна з низьким коефіцієнтом тертя і малою схильністю до задир. Дійсно, з цим правилом задовольняли свого часу всі відомі тоді підшипникові сплави. Однак в подальшому були розроблені сплави (наприклад, свинцева бронза), у яких м'які включення свинцю розподілялися в твердій матриці.

Оскільки до теперішнього часу немає універсальних критеріїв для обґрунтування вибору раціональних антифрикційних матеріалів, на практиці фахівці вдаються до експериментальних методів лабораторних і дослідно-промислових випробувань матеріалів, до наявного досвіду в трибології промислового застосування трибоматеріалів на виробництві.

Для підшипників ковзання найбільш широко застосовують антифрикційні сплави на основі міді та алюмінію, залізовуглецевих сплави, порошкові матеріали та ін. [7, 8]. При зношуванні по шару абразиву, про незакріплені абразивні частинки ряд збільшення абразивної зносостійкості матеріалів можна представити таким

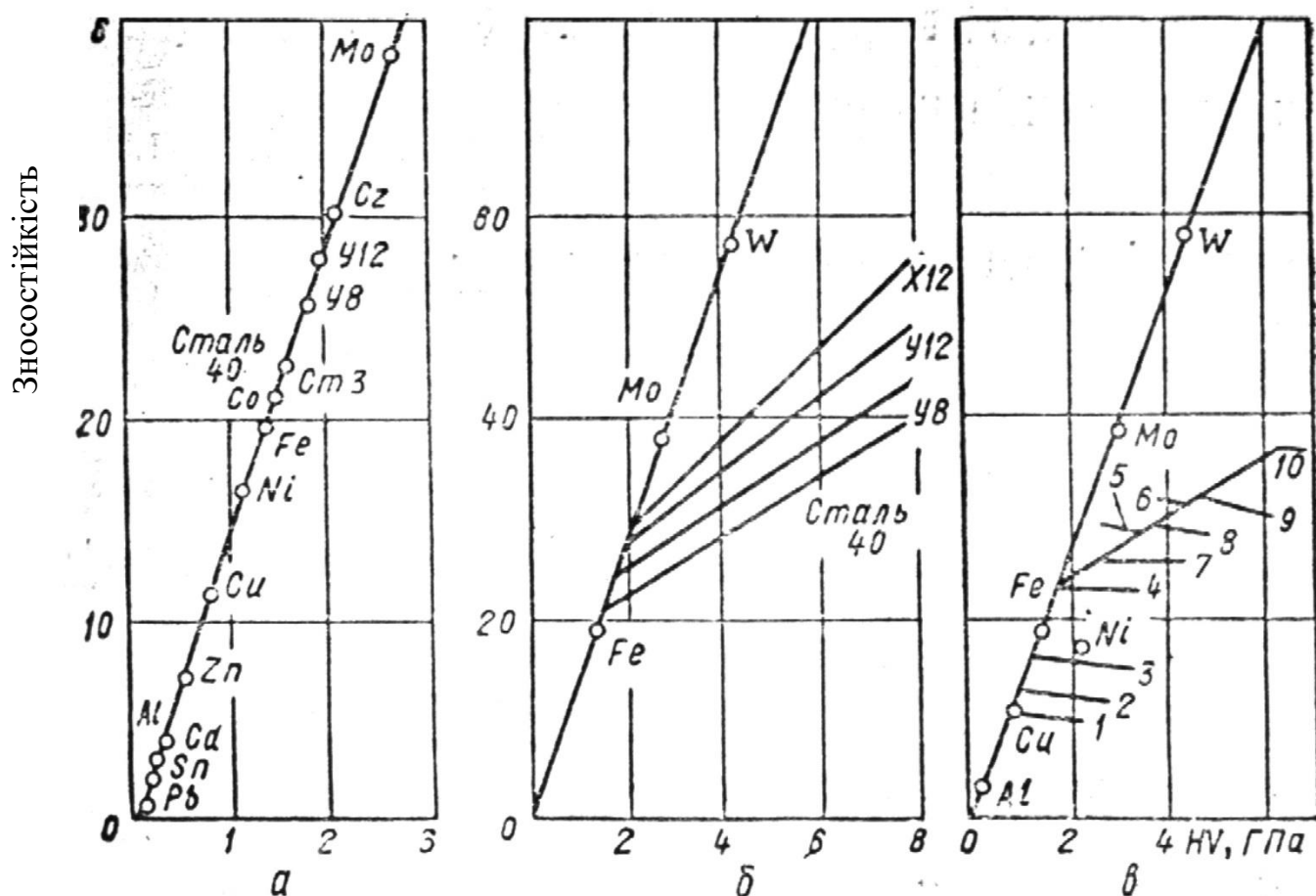
чином: пластмаси, кольорові метали, сталі, чавуни.

**Залізовуглецеві сплави.** Підшипниковими матеріалами на основі заліза є перлітний чавун та графітизована сталь. Найбільш часто застосовують антифрикційні чавуни: сірі (АЧС) з пластинчастим графітом, високоміцні (АЧВ) з глобулярним графітом, ковкі (АЧК) з пластівчастим графітом і мідисті. Ці матеріали характеризуються високою твердістю (НВ 160...250), завдяки перлітній складовій. Через високу твердість чавуни погано прироблюються, чутливі до перекосів в вузлах тертя, не можуть поглинати тверді абразивні частки, що часто призводить до заїдання поверхонь тертя. Чавунні підшипники застосовують з валами підвищеної твердості ( $HRC \geq 55$ ), цементованного або загартованими, шліфованими і полірованими. М'які антифрикційні чавуни (АЧС-3, АЧВ-2, АЧК- 1) в легкому режимі можуть працювати в парі з нормалізованими або поліпшеними сталями ( $HRC\ 25...35$ ). Коефіцієнти тертя чавунних підшипників з загартованим валом істотно залежать від змін тиску і частоти обертання, наприклад, зростають для швидкостей ковзання нижче  $0,5\ \text{м / с}$ , причому в цьому випадку питоме навантаження не повинне перевищувати  $1,5\ \text{МПа}$  через небезпеку заїдання.

Сірі ковкі і високоміцні чавуни, які містять графіт і металеву основу з феритної, ферито-перлітної або перлітної структури мають низьку абразивостійкість. Чавуни в структурі яких переважають тверді карбідні фази є більш зносостійкими. Найбільшою зносостійкістю характеризуються чавуни з аустенітною, мартенситною або аустенітно-мартенситною основою, яка забезпечує міцне утримання твердих складових і перешкоджає їх викришування. Легування чавунів хромом і вуглецем призводить до утворення дисперсних карбідів типу  $(\text{FeCr})_3\text{C}$  - до  $10\% \text{ Cr}$  і  $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$  при  $\% \text{ Cr} > 10\%$  [30]. Зміна форми графіту з пластинчастої на кулясту підвищує зносостійкість чавуну [28], однак в парі з загартованої сталлю має місце задироутворення [29].

Дослідні дані по зносостійкості сталей наведені на рис. 1.1 [31]. При зношуванні матеріалів на абразивному колі залежність відносної зносостійкості ( $\epsilon$ ) від співвідношення  $N_a / N_m$  виражається емпіричною формулою:

$$\varepsilon = e^n (H_a / H_\mu)^{-1},$$



а - технічно чисті метали і вуглецеві сталі після відпалу; б - сталі Y12, X12, Y8 і 40 у відпаленому і термообробленому стані (гартування, відпуск); в - сталі і технічно чисті метали Al, Cu, Ni з різним ступенем наклепу після пластичної деформації; 1 - латунь (20% Zn); 2 - алюмінієва бронза (5% Al) після відпалу і наклепу; 3 - берилієва бронза Бр. Б2 після гартування і наклепу; 4 - сталь 40 з різним ступенем наклепу після відпалу; 5 – аустенітна наклепана сталь (0,2% C; 18% Cr; 9% Ni); 6 - сталь 40 після гартування і відпуску при різних температурах; 7 - сталь 40 з різним ступенем наклепу після попереднього гартування від відпуску при температурі 6000C; 8 - те ж, при 4500C; 9 - той же, при 3000C; 10 - той же, при 1500C [31].  $\varepsilon = KHV$ .

Рисунок 1.1 - Відносна зносостійкість ( $\varepsilon$ ) під дією зношування карборундовою шкіркою в залежності від твердості зношування матеріалів.

**Порошкова металургія** дозволяє отримати компактні і пористі матеріали, як однорідні, так і у вигляді композицій з металів, що не змішуються в розплаві, що не утворюють тверді розчини, а також інтерметаллідні з'єднання і композиції-суміші з металів і неметалів. Переваги порошкової металургії перед литтям, полягає в зменшенні витрати металу на механічну обробку за рахунок отримання точних заготовок і готових виробів. Однак через високу вартість технологічних прес-форм застосування порошкових матеріалів економічно вигідно лише при виробництві від 500 до 10000 виробів одного типу в залежності від розміру деталі. Висока вартість порошку (вуглецева і низьковуглецевий сталі, отримані з порошків, в 3...4 рази дорожче аналогічних сталей в прутки звичайного металургійного виробництва) і енергоємність процесу спікання також роблять цей метод менш вигідним, ніж лиття в кокіль, під тиском і т.д. [10]. Технологічний процес виробництва деталей з порошку (холодне пресування - спікання - гаряче пресування - механічна обробка) складніше ливарної технології. Проте доцільність застосування порошкової металургії доведена для отримання складних відповідальних машинобудівних деталей.

Пористі антифрикційні матеріали отримують спіканням суміші порошків бронзи, заліза, графіту [33]. Найбільш поширений склад пористої бронзи: 83...85% міді, 9,5...10,5% олова, 4...10% свинцю, 1,5-2% графіту. При спіканні в матеріалі утворюються пори, які служать в якості мінірезервуарів мастила: при обертанні цапфи масло виходить з пор і утворює суцільну плівку - відбувається самозмазування підшипника. Спад масла в порах заповнюється періодично зануренням підшипника в нагріту олію (50...100° С) або шляхом безперервної подачі його до зовнішньої поверхні підшипника. У пористих підшипниках витрата масла зменшується в 10 разів у порівнянні з витратою його в бронзових підшипниках, нівелюється вплив твердих абразивних частинок. Ступінь пористості визначає величину допустимого навантаження на підшипник. Так, наприклад, при важкому навантаженні, особливо змінної, потрібна велика міцність підшипника, це обмежує застосування порошкового матеріалу: 25...35% для роботи при великих швидкостях і малих навантаженнях; 10...18% - для малих швидкостей при середніх

і високих навантаженнях.

**Антифрикційні сплави з кольорових металів.** До них відносяться бронзи, бабіти, сплави алюмінію.

Бронзи досить широко застосовують для підшипників ковзання. Найбільш поширені олов'яністі, олов'янисто-свинцеві і олов'янисто-цинково-свинцеві бронзи. Високими антифрикційними властивостями володіють олов'яно-фосфористі бронзи типу БрОФ. Деталі з олов'яної бронзи з вмістом олова 0,5% відливають, а з меншим вмістом Sn - штамнують. Шляхом відпалу твердість бронз знижують до HB 50...60. Бронзи меншою твердістю повинні працювати по цапфі з твердістю не менше HRC 50, а бронзи підвищеної твердісті вимагають збільшення твердісті вала HRC більш 55. За цапф з низькою твердістю бронзи працюють погано - схильні до задирам в процесі підробітки. Для поліпшення прироблюваності в бронзу вводять свинець, який знижує її твердість і збільшує пластичність. Ці бронзи мають хороші антифрикційні властивості і застосовуються в підшипниках з порівняно високими навантаженнями і швидкостями ковзання. Свинець в свинцевих бронзах повинен знаходитися у вигляді окремих включень, рівномірно розподілених в матриці. Подвійна система Cu-Pb характеризується обмеженою розчинністю компонентів в рідкому стані, відсутністю хімічних сполук і взаємної розчинності в твердому стані. Плавка свинцевою бронзи представляє великі труднощі через схильності свинцю до ліквації, який може відшаровуватися на дні тигля і в нижній частині виливка.

Підшипникові матеріали з кольорових металів Sn, Pb, Cd, Sb, Zn, що характеризуються наявністю твердих структурних складових в пластичної матриці, називають бабітами. Їх заливають на підігріті втулки (250° C) при температурі 450...4800C. Найчастіше застосовують відцентрову заливку. Заливають кокіль і під тиском, товщина заливки в підшипниках 1-3 мм. Бабіти мають високі антифрикційні властивості, добре прироблюються, мають низький коефіцієнт тертя при граничній мастилі, здатні працювати при попаданні невеликої кількості абразивних частинок в зазор підшипника. Твердість валу при роботі з бабітових підшипниками - HRC 25...35. Для підвищення довговічності підшипників твердість

валів збільшують до HRC 50...55.

Зі зменшенням товщини заливки підшипника опір впливу абразивних частинок знижується. Мінімальна товщина заливки бабіту (допускається 0,25...0,4 мм) залежить від розмірів, кількості, форми, твердості частинок. Для економії олова розроблені нізкоолов'янисті бабіти, які мають однак гірші антифрикційні властивості в порівнянні з високоолов'янистими. Істотним недоліком бабітів є їх малий опір втоми, особливо при підвищенні температури понад 1000С.

**Сплави на основі алюмінію.** Ливарні сплави для невідповідальних підшипників складаються з алюмінію і кремнію (АЛ2, АЛ4, АЛ5), алюмінію і магнію (АЛ8), алюмінію і міді (АЛ10В, АЛ18В). Твердість сплавів невелика (НВ 65-70). Підшипники отримують також штампуванням (сплави АК2, АК4, АК4-1). Більш високі антифрикційні властивості мають алюмінієві сплави з невеликим вмістом нікелю, олова, сурми і кремнію. Алюмінієві сплави мають гарну корозійну стійкість. Вали, що працюють в підшипниках з алюмінієвих сплавів, повинні мати твердість більш HRC 50. Недолік алюмінієвих сплавів - високий коефіцієнт термічного розширення, що необхідно враховувати при виборі зазорів втулка - вал. При нагріванні до порівняно високих температур алюмінієвий сплав НЕ плавиться як бабіт і не впливає, поверхня його не пошкоджується; однак може відбутися заклинювання системи [9].

Застосовування в машинобудуванні традиційних антифрикційних кольорових металів (бабіти, бронзи та ін.) має ряд недоліків [11, 12, 44], що істотно обмежує їх використання:

- неможливість роботи в режимі сухого тертя (навіть при короткочасній зупинці процесу змазування);
- низькі граничні робочі температури трибодеталей;
- низька ремонтпридатність після відмови;
- руйнування основної деталі (вала) ковзання при відмові вкладиша з традиційного матеріалу;
- високі вимоги до якості мастила;
- дефіцит і зростаюча висока вартість кольорових металів;

Складнолеговані бронзи використовують для підшипників ковзання при малих і середніх навантаженнях (до 5МПа). Підвищення питомої навантаження понад допустиму призводить до швидкого їх руйнування [25].

Внаслідок низької твердості кольорові метали погано пручаються абразивного зношування (рис. 1.1...1.3). Наведені дані свідчать про те, що сплави на основі міді істотно поступаються сплавів на залізній основі як абразивостійкі матеріали. Крім того, наведений вище аналіз триботехнічних характеристик традиційних антифрикційних матеріалів, можливостей і обмежень їх використання в якості підшипникових в жорстких умовах експлуатації, в т.ч. в присутності твердих абразивних частинок, свідчить про те, що сьогодні немає універсальних матеріалів, які відповідають усім сучасним техніко-економічним вимогам промисловості: високої зносостійкості, задиростійкості, абразивостійкості, технологічності, і одночасно доступною для масових галузей машинобудування ціни. Зазначені вище недоліки стимулюють пошук і розробку нових порівняно недорогих антифрикційних матеріалів з поліпшеними триботехнічними характеристиками в екстремальних умовах експлуатації: при сухому терті, підвищених температурах, навантаженнях, при наявності абразивних частинок і т.д. Перспективним напрямом вирішення проблеми підвищення адгезійної і абразивостійкості матеріалів є розробка і застосування композиційних матеріалів. Сьогодні багато матеріалознавців прийшли до висновку, що композитам які є високозносостойкіми, антифрикційними матеріалами належить майбутнє [15...23]. Розроблено і отримали промислове застосування композити різного типу, в т.ч. на основі металевої матриці, армовані металевими і неметалевими елементами. Проведені дослідження і дослідно-промислові роботи показали, що композити ЛКМ мідь - сталь є успішною альтернативою кольоровим і деяким іншим підшипниковим сплавам і матеріалам [11, 13, 14, 17, 22, 33, 34].



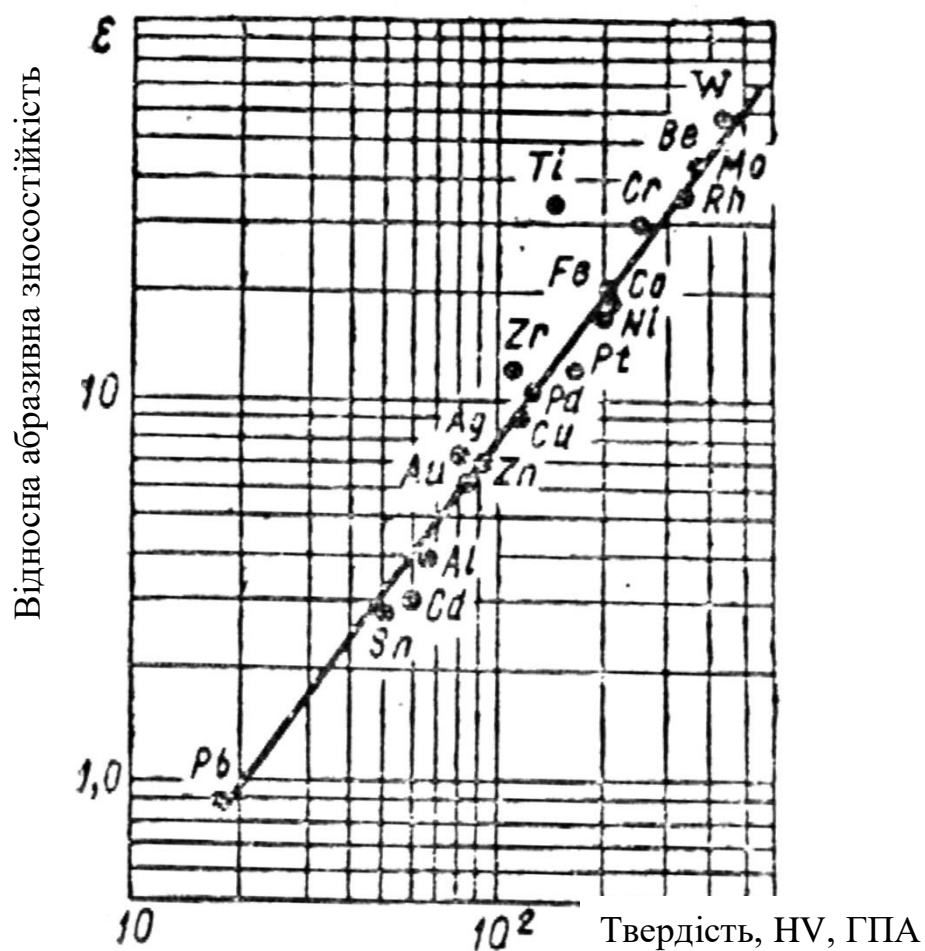


Рисунок 1.2 - Залежності відносної абразивної зносостійкості металів від твердості HV [32].

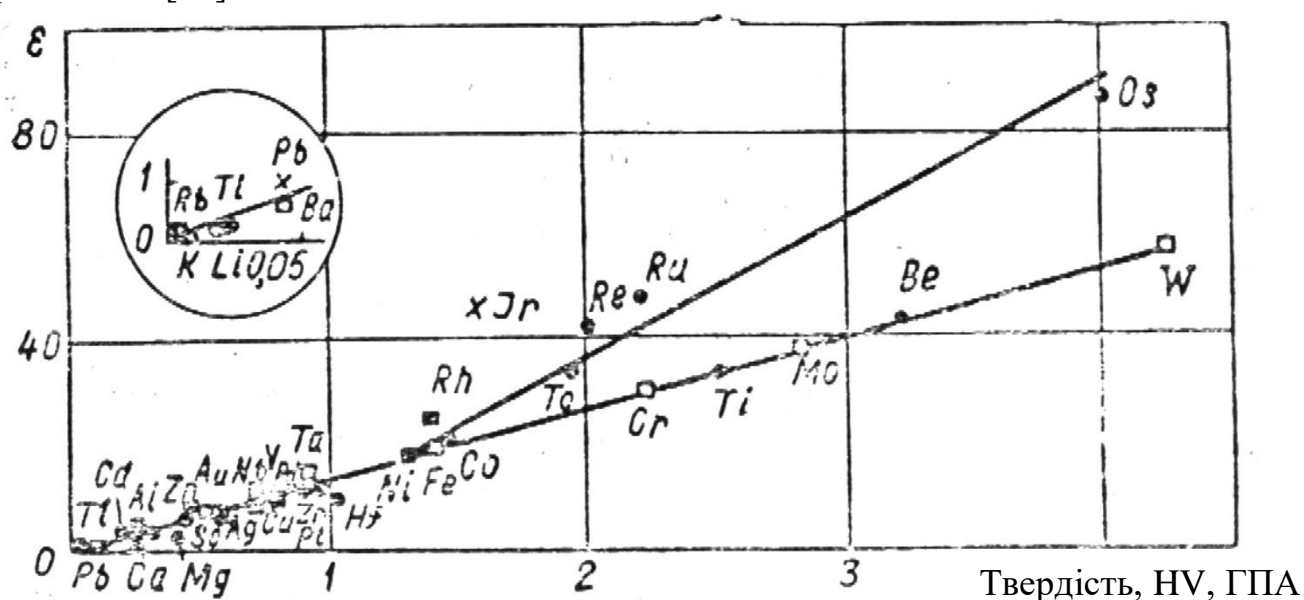


Рисунок 1.3 - Залежність відносної зносостійкості металів від модуля нормальної пружності при зношуванні про абразивний круг [32].

Конструювання композиційних матеріалів дозволяє отримати необхідне поєднання властивостей виробів із заданою структурою та властивостями. Незважаючи на значний обсяг досліджень і отримані успішні результати по впровадженню КМ різного типу в промисловість, механізм і кінетика абразивного зношування макрогетерогенних металокомпозитів вивчені явно недостатньо: не вивчені характер і інтенсивність руйнування гетерогенних поверхонь в результаті абразивного впливу твердих частинок, не визначені можливості ефективного застосування ЛКМ при експлуатації в абразивно активному середовищі в порівнянні з моносплавами. Однак проведений аналіз поведінки матеріалів різних складів і будови дозволяє апріорі прогнозувати переваги макрогетерогенних ЛКМ мідь - сталь, як антифрикційного і абразивостійкого матеріалу. Відсутність достовірної інформації про вплив будови, механічних властивостей окремих структурних складових, так і їх сукупності ускладнює вибір раціональних складів КМ і формулювання рекомендацій щодо ефективного застосування макрогетерогенних ЛКМ мідь - сталь в різних умовах впливу абразивних частинок при сухому і граничному терті ковзання. У даній роботі вперше вивчалася поведінка ЛКМ мідь - сталь в умовах впливу різних дисперсних абразивів при терті ковзання при варіюванні типів частинок і умов навантаження тертям ковзання.

Однозначно встановлено і далі викладаються особливості зношування, переваги антифрикційного ЛКМ мідь - сталь в присутності абразивних частинок, визначені можливості підвищення опору матеріалу їх впливу.

## 1.2 Аналіз процесів абразивного зношування і методів випробування антифрикційних підшипникових матеріалів

Види абразивного зношування підшипників ковзання та ін. трибодеталей. Інтенсивність абразивного зношування матеріалу залежить від виду взаємодії твердих частинок з контактною поверхнею деталі. Розрізняють зношування жорстко закріпленими абразивом; вільним абразивом (в обсязі абразивних частинок); зношування при наявності абразивних частинок в контакті, що труться, гідроабразивне, ударно-абразивне зношування.

Як вказувалося вище завдання цього дослідження - визначити за допомогою стандартних методів випробування абразивостійкості матеріалів особливість і інтенсивність зношування антифрикційних ЛКМ в порівнянні з мономатеріалами в умовах впливу дискретних абразивів, характерних для експлуатації в вузлах тертя типу підшипників ковзання та ін. трибодеталей. При випробуваннях на абразивостійкість важливе значення має застосовуваний вид впливу абразивних частинок. Для практичних цілей найбільш прийнятний і інформативний метод, який найкращим чином імітує процес, що відбувається в досліджуваному зчленуванні машини, сертифікований ГОСТом і застосовується багатьма дослідниками. До таких методів випробування відносять: випробування матеріалу при терті зразків по абразивної шкірці (ГОСТ 17361-71); випробування матеріалів на абразивне зношування при терті і не жорстко закріплені абразивні частинки (ГОСТ 23.208-79).

Для отримання надійних і стабільних значень зносостійкості матеріалів по закріпленим частинкам при лабораторних випробуваннях прагнуть забезпечити безперервне оновлення твердих зерен і сталість інших параметрів. Застосовують ряд видів моделювання зношування матеріалів по абразивної шкірці, про моноліт і абразивний круг (рис. 1.4) [30, 31]. Випробування металів на абразивне зношування шляхом тертя об шліфувальний камінь заснований на тому, що торець зразка третється об плоску сторону карборундових або електрокорундового кола, що встановлюється в машині тертя, або в горизонтальне, або вертикальне положення (рис. 1.4. г, е, ж, з ). Знос визначають по втраті ваги. Цей метод для лабораторних

випробувань не знайшов широкого поширення по ряду причин:

- тертя металу об абразивний круг здійснюється, як правило, при дуже низькій швидкості ковзання щоб уникнути нагріву поверхневого шару зразка;

- при терті металу об абразивний круг останній змінює свою абразивну здатність, внаслідок затуплення або руйнування абразивних зерен, зношування зв'язки і, в результаті цього, викришування зерен абразиву, заповнення пір продуктами зносу металу і самого кола;

- різні за своїми властивостями матеріали по-різному взаємодіють з колом. Все це створює великі труднощі для забезпечення однакових умов випробування і повторюваності результатів.

На підставі аналізу результатів досліджень абразивного зношування, проведених різними авторами, нами зроблено висновок про безумовних перевагах методу випробування, заснованого на терті про закріплення абразивні частинки (про шліфувальну шкурку) (рис. 1.4. а, б, в, д):

- відомий шлях тертя і ін. Параметри абразивного тертя для даного конкретного випадку випробування;

- можна дослідити вплив навантаження, що передається через абразивні частинки, швидкості взаємного переміщення матеріалу і абразиву, ін. Чинників;

- в процесі впливу абразивний частка не повертається, що не перекочується, вона може тільки втратити свою первісну гострокутну форму;

- є можливість використовувати тільки «свіжу» абразивну поверхню.

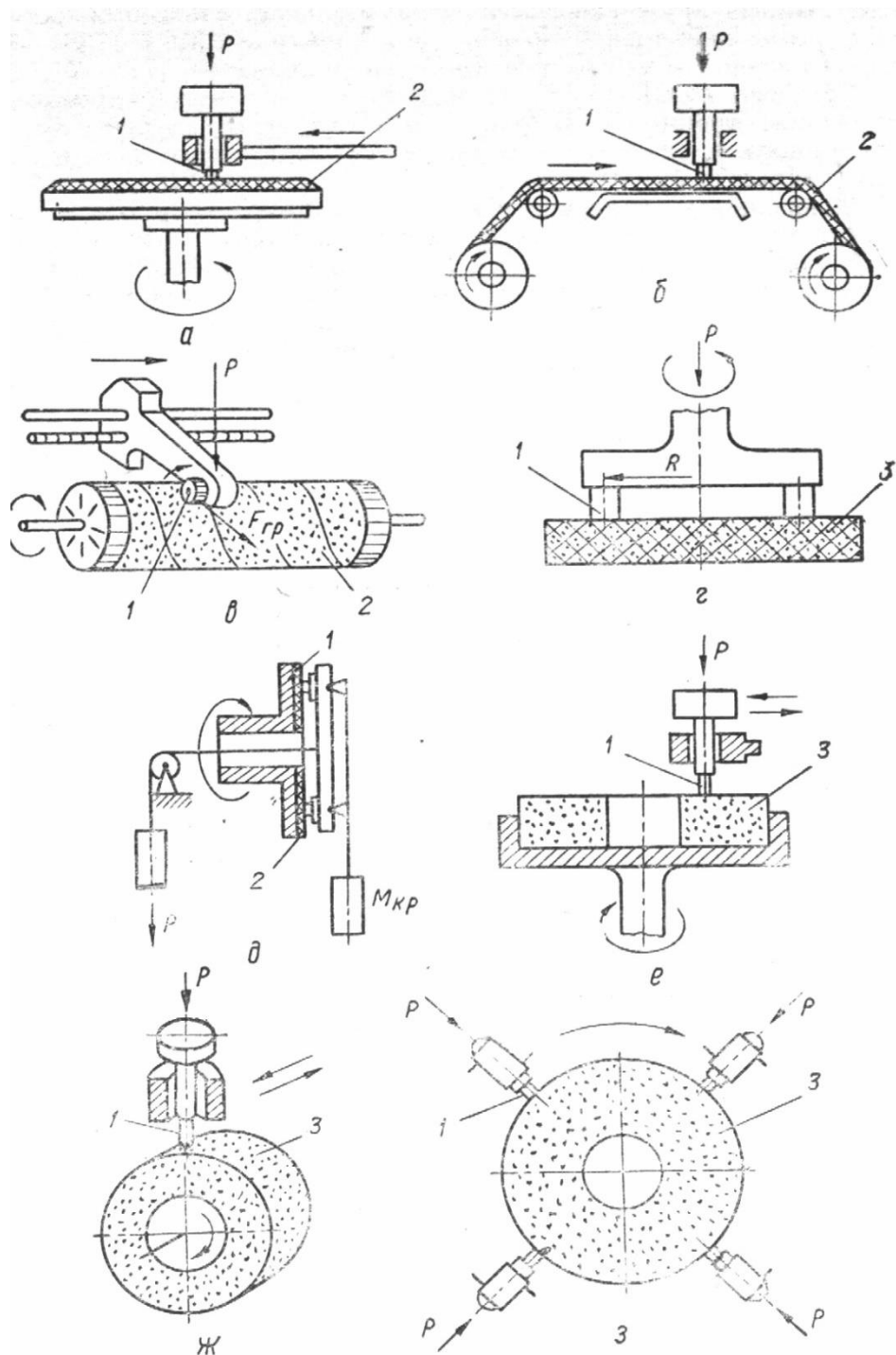


Рисунок 1.1 - Схеми випробування матеріалів на зношування при терті зразків по абразивній шкірці (а, б, в, д) і про абразивний круг (г, е, ж, з) [30, 31]: 1 - зразок; 2 - абразивна шкірка; 3 - абразивний круг або моноліт.

Зношування при терті про незакріплені абразиви вивчають при терті: 1) про абразивну прошарок; 2) в обсязі сипучого абразивного матеріалу. Зношування при

терті об абразивну прошарок відбувається тоді, коли між поверхнями твердих тіл, що знаходяться у відносному русі, є вільні абразивні частинки, через які від одного тіла до іншого передається навантаження. Залежно від властивостей цих тіл і абразивних частинок, ін. Чинників при терті може статися шаржування більш м'якій поверхні твердими частинками. В цьому випадку умови зношування будуть аналогічні абразивного зношування про закріплення частки. Випробування в обсязі сипучої абразивної маси отримало визнання трибологів і проведено нами за відомим методом В. Лоренца - «спосіб гільзи» [31].

Зношування при наявності абразивних частинок в контакті, що труться деталей машин відбувається за умови, коли в зону тертя потрапляє абразив з боку (пил, пісок з повітря, разом з горючими і мастильними матеріалами, паливом тощо.), Або в результаті утворення твердих частинок в процесі роботи пари тертя (продукти зносу деталей, коксування олив, нагар і ін.). Прошарок може складатися з одного або декількох шарів. Абразив може бути різної природи і володіти, природно, різними властивостями. Навантаження, що передаються через абразивні зерна, можуть бути неоднаковою величини. Може бути різним характер відносного руху твердих тіл, а також можуть мати місце різні співвідношення механічних властивостей трьох тіл: двох твердих і абразиву. Таким чином, зношування при терті об абразивну прошарок відрізняється великою різноманітністю можливих умов і більшою складністю в порівнянні з зношуванням про закріплення абразивні частинки [30, 31]. Тому різноманітні схеми і методи, що застосовуються при випробуваннях матеріалів про не жорсткозакріпленими абразивні частинки (рис. 1.5) [30, 31]. Наприклад, варіант, коли зразок ковзає по поверхні мідного кільця, розташованого на дні посудини з абразивної сумішшю (машина Фаренвальда) (рис. 1.5 а). У цьому випадку можливе використання водної суспензії абразивних частинок. У машині К2-А зношуються плоскі поверхні двох кілець однакового діаметра розташовані співвісно, де обертається нижнє кільце. При випробуванні в машині Х6-Б здійснюється ковзання втулки, здійснює зворотно-поступальний рух, по кільцю (рис. 1.5 б), а абразив подається в зону ковзання. Відомі машини і установки, в яких використовують гумовий зношується елемент. Наприклад, ролик

або диск з прорізами на периферійній поверхні, крізь які подаються частки абразивного порошку або шнек (прилади марки ПВ-8 і ПВ-7), при обертанні якого в зону тертя надходить абразив. Машина тертя МІ-1, де використаний варіант пари тертя: кільце - кільце або кільце - колодка. Установка, в якій по плоскій поверхні зразка, куди подається абразив, зворотно-поступально рухається мідна пластина.

Найбільшого поширення при випробуваннях на абразивне зношування отримав метод Бринеля і його варіанти, що використовують схему витирання лунки диском, захопившим абразивні зерна. Машина (рис. 1.5 в, г), де зразок зношується абразивом за допомогою обертового металевого ролика.

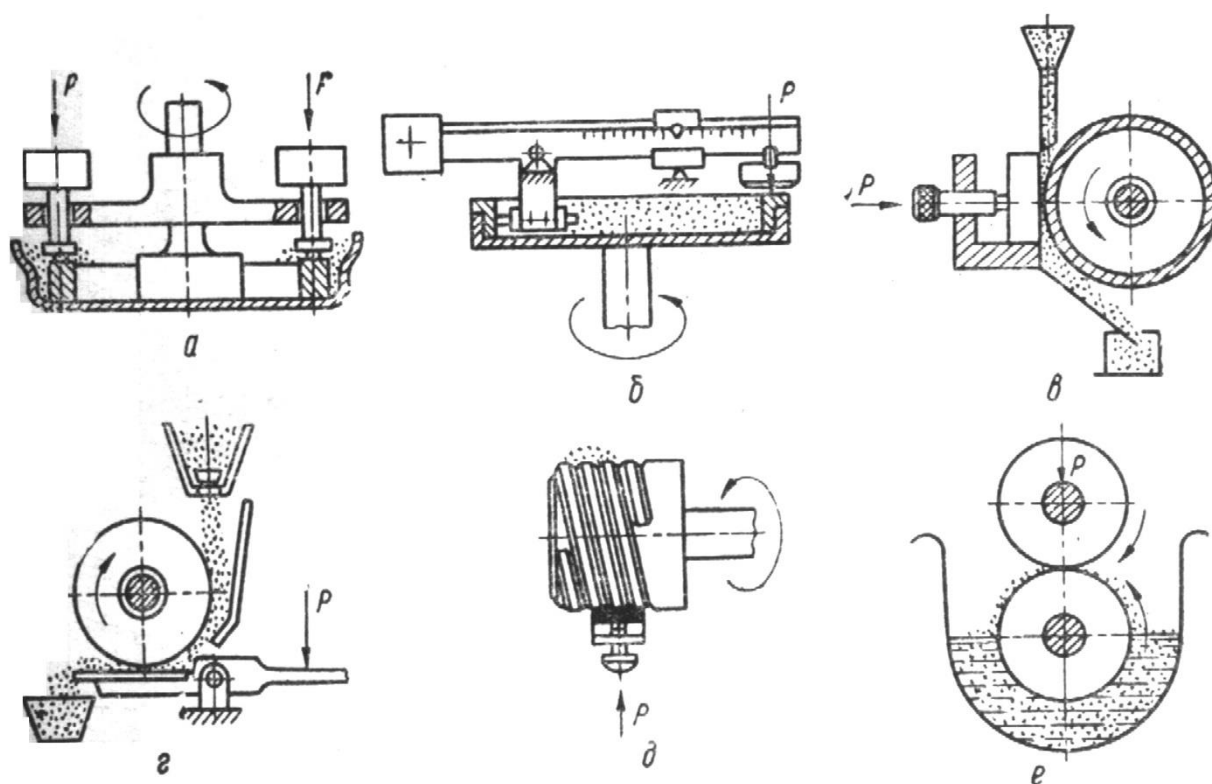


Рисунок 1.5 - Схеми методів випробувань матеріалів на зношування при наявності абразивних частинок в контакті, що труться [31].

В цьому випадку зразок у вигляді пластини встановлюється у вертикальній площині щодо осі вала. За таким же принципом працює установка Бринеля-Хауорта. В установці Хауорта зразок і ролик, занурений на  $1/3$  в ємність з абразивом, обертається в зворотному напрямку, захоплюючи абразив в зону тертя від низу до верху (рис. 1.5 е).

Деталі робочих органів і інструментів сільськогосподарських, гірських, будівельних, дорожніх машин, елементів обладнання металургійних заводів і підприємств промисловості будівельних матеріалів піддаються зношуванню при роботі в абразивній масі ґрунту, руди, вугілля, піску, глини, золівідходів, шлаків та ін. З поверхнею деталі при цьому стикаються порівняно слабо пов'язані між собою тверді частинки з різними механічними властивостями, різної форми і розмірів. У зв'язку з необхідністю обґрунтованого підбору трибоматеріалів дослідження зношування матеріалів в таких умовах має важливе значення.

Застосування стандартних методик дозволяє отримати достовірні дані, необхідні для порівняння стійкості і визначення прийнятних умов експлуатації ЛКМ. Методики лабораторних випробувань розглянуті в 3 розділі справжнього звіту.

Режими тертя в підшипнику ковзання. Характер і інтенсивність руйнівної дії абразивних частинок, очевидно, залежить від умов тертя в підшипнику ковзання по мірі зростання: при рідинній мастилі; при граничній мастилі; при сухому терті. Режими тертя в підшипнику ковзання, умови переходу від одного виду тертя до іншого описує діаграма Герси (рис. 1.6), в якій коефіцієнт тертя  $f$  пов'язаний з параметром  $\eta V / P$ , де  $\eta$  - в'язкість мастила;  $V$  - швидкість ковзання;  $P$  - тиск [7]. При малій швидкості ковзання поверхонь ( $V$ ) гідродинамічний ефект їх повного відділення не спостерігається, тому що масло видавлюється з зазору. Зі збільшенням  $V$  гідродинамічні сили зростають і взаємодія поверхонь знижується. Мінімальний коефіцієнт тертя відповідає початку тертя на рідинній мастилі. Аналогічне явище спостерігається при зміні в'язкості мастильного матеріалу: при малій в'язкості ( $\eta$ ) масла рідинного змащення не буде, але після досягнення мінімального  $f$  зі збільшенням в'язкості масла підвищується опір зношування. Протилежно вплив питомого навантаження ( $P$ ): при великому тиску на опору умови для рідинного змащення несприятливі. Зниження навантаження супроводжується збільшенням товщини шару, що несе мастильного матеріалу



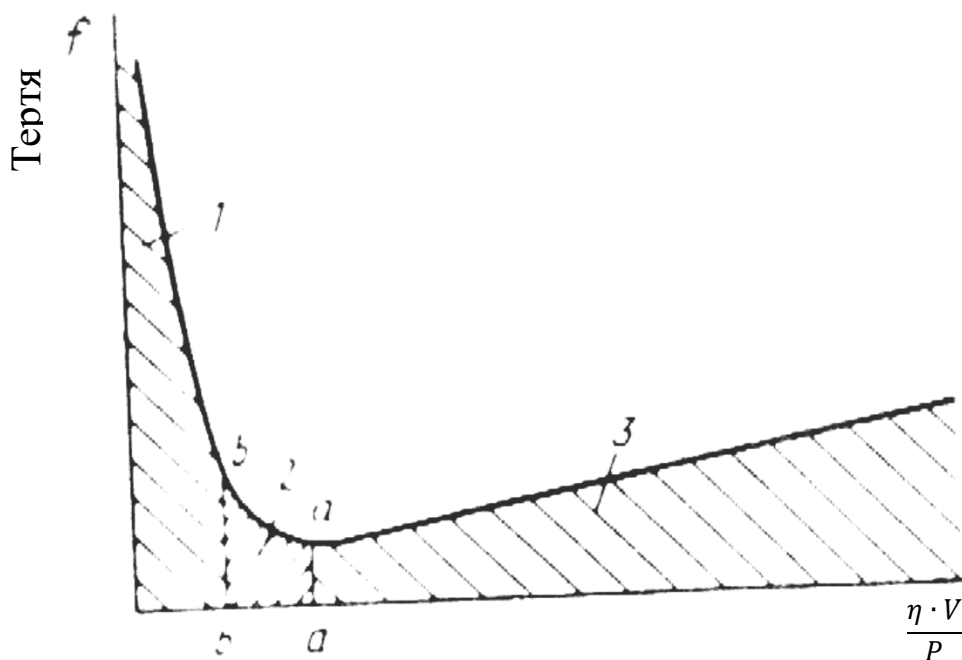


Рисунок 1.6 – Діаграма режимів тертя в підшипнику: 1 - тертя незмазаних поверхонь; 2 - тертя при граничній і при напіврідкій смазці; 3 - тертя при рідинній смазці.

і зменшенням опору тертю. При запиленості і підвищеній температурі середовища виникають складності виконання надійних ущільнювачів пристроїв, необхідність регулярно, через короткі проміжки часу змащування вузлів тертя дорогим, пластичним мастильним матеріалом і т.п. На практиці, наприклад, для підшипників ковзання політ транспортних візків аглофабрик; підшипників ковзання прокатних станів; конвеєрів перед нагрівальними печами, коли температура середовища, досягає 600...6500С і вище, в умовах запиленої середовища досить дорого і складно або взагалі неможливо забезпечити стабільно сприятливий режим роботи вузлів тертя обладнання за допомогою змазування пластичним мастильним матеріалом. Здатність підшипникового матеріалу працювати в присутності абразивних частинок є важливою його експлуатаційної характеристикою. Наприклад, при товстому шарі бабітові покриття потрапляння абразивних частинок не викликає серйозних порушень в роботі підшипника. Внаслідок недоліків, властивих бабітом (малий межа витривалості, низька робоча температура і т.д.) змушені застосовувати антифрикційні бронзи і ін. Однак через

їх підвищеної твердості вони працюють при змащувальному матеріалі, що містить абразив, гірше, ніж бабіт.

**Аналіз особливостей абразивного зношування антифрикційних металокомпозитів.** Сучасні трибоматеріалів повинні мати високу несучу здатність і відносно легку можливість ковзання робочих поверхонь. Великий інтерес і перспективи для створення міцних матеріалів, які краще чинять опір абразивного зносу представляють матеріали, штучно укріплені (армовані) твердими включеннями [36]. Головною особливістю структурної будови таких гетерогенних матеріалів (КМ) є строго диференційоване виконання функцій компонентами. У антифрикційних металокомпозитів основне навантаження несе матриця - несуча частина матеріалу, а формування екранують захисних шарів, які запобігають захоплення з валом, блокування руйнівного впливу, асиміляцію, винос із зони тертя твердих частинок, ендогенного і екзогенного походження забезпечують розділові пластичні плівки, що утворюються в процесі тертя ковзання на поверхні тертя під впливом тиску, швидкості ковзання, температури, яка акумулюється при роботі рухомого з'єднання в матеріалі підшипника ковзання та вала.

Агрегати гірничо-металургійного комплексу та ін. Галузей промисловості мають безліч трибовузлів, експлуатаційна стійкість яких не відповідає сучасним вимогам. Тому проблема підвищення стійкості трибодеталей є актуальною.

В даний час до 65% обсягу деталей трибовузлів виготовляють з цементованих сталей, близько 15% - з легованих хромистих сталей різних структурних класів і близько 20% - з КМ [38]. Деталі трибовузлів в процесі експлуатації схильні до зазвичай високошвидкісного абразивного зносу, вигину, сплющування, циклічної деформації і локального розігріву. В принципі цементована сталь є КМ на залізній основі: багата вуглецем зовнішня зона використовується в якості робочого органу, взаємодіє з низьковуглецевої (до 0,3% С) серцевиною. При цьому в контактній зоні створюються сприятливі стискають напруги, що сприяють підвищенню ресурсу композиту. Карбідні частки пластинчастої або кулястої форми в структурі стали є «природними» армуючими фазами, нівелірними і розсіюють процеси зародження і розвитку тріщини, при цьому в робочому шарі цементованого композиту

створюються перешкоди для переповзання дислокацій [39].

**Природа і морфологія часток абразиву робить вирішальний вплив на експлуатаційні властивості трибокомпозита.** Абразивне зношування викликають дисперсні частинки руди, вугілля, породи, золи та ін., Що потрапили на поверхню тертя, металевий пил або стружка, окисні плівки, закріплені на поверхні тертя або «вільні» (зруйновані), нагар і дисперсні продукти зношування, особливо викришиться частинки твердих структурних складових [6, 31]. При вивченні характеру і інтенсивності впливу абразивів на контактну поверхню ЛКМ використовували частинки різної твердості ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ , алмаза), які найбільш часто зустрічаються в практиці експлуатації триботехнічних сполучень і трибодеталей. Застосування гами абразивних частинок дозволило встановити вплив таких чинників, як твердість абразиву, співвідношення величин твердості матеріалу і абразиву, ін. Чинників, що визначають знос, отримати інформацію про вплив абразивних частинок різної природи на властивості ЛКМ як антифрикційного матеріалу, що має макроретерогенну структуру. Вплив співвідношення твердості абразиву і матеріалу. Ставлення твердості зношуваного матеріалу до твердості абразиву ( $H / H_a$ ) називають критичним параметром [6]. Інтенсивність зношування зменшується, як тільки твердість зношеної поверхні досягає твердості абразиву. Якщо ж вона перевищує твердість абразиву, то інтенсивність зношування різко знижується [1]. Вплив цього співвідношення обумовлено зміною природи контакту. При  $0,6 < H / H_a < 0,8$  умови сприяють зростанню пластичної деформації. При  $K_t < 0,5$ , тобто коли абразив в 2 рази і більше твердіше зношуваного матеріалу можливо пряме руйнування мікрооб'ємів поверхневого шару матеріалу під дією абразивного частки. При цьому абразивний частка, як показує досвід, має достатню міцність, щоб зруйнувати матеріал, зберігши свою цілісність і форму.

Якщо  $K \geq 0,7$ , то пряме руйнування неможливо, тому що контактний виступ частинок руйнується перш, ніж напруга в деформується обсязі досягає критичного значення. Чим  $K > 0,7$ , тим нижче рівень контактних напруг і тим слабкіше інтенсивність зношування матеріалу. Вплив величини критерію  $K$  на характер зношування пов'язане також з особливостями структури матеріалу, умовами

навантаження, розміром і міцністю частинок. Як буде показано далі, макрогетерогенна структура ЛКМ, що складається з твердих гранул, оточених пластичної матрицею, зумовлює зменшення руйнування контактної поверхні матеріалу під дією абразивних частинок. При низькому навантаженні абразивні частинки можуть вільно перекочуватися при русі через зношувану поверхню і менш здатні до впровадження і дряпання поверхні. Дослідження[7] показали, що в результаті впресовування твердих частинок в робочий шар, підшипники з серійних антифрикційних матеріалів, що були в експлуатації, мають більш високий коефіцієнт тертя (на 20...30%), більш тривалий період підробітки (на 30...40%) і менше навантаження до заїдання (на 20...30%) у порівнянні з новими підшипниками. При великому ковзанні абразивних частинок може відбутися заклинювання, заїдання і передчасний неконтрольований вихід з ладу вузлів тертя з втулками з серійних антифрикційних бронз. Існуючі методи не дають ефективних способів вирішення цієї проблеми - необхідні нові трибоматеріалів, створені з урахуванням механізмів руйнівної дії абразивних частинок на зв'язані поверхні.

Відповідно до поставленим завданням, вивчали вплив деяких важливих факторів при зношуванні ЛКМ мідь - сталь в присутності абразивних частинок в порівнянні з серійними антифрикційними матеріалами.

Розглянемо деякі, з найбільш відомих і використовуваних дотепер залежностей величини зносу (втрата ваги або обсягу матеріалу) від основних параметрів процесу. Формула Аргарда, запропонована ним в 1953 році для адгезійного зношування, була дуже корисною і для абразивного [42]:

$$W = K \frac{Ld}{H_m}, \quad (1.1)$$

де  $W$  - обсяг вилученого матеріалу;

$K$  - константа, що залежить від умов зношування;

$L$  - навантаження;

$d$  - шлях тертя;

$H_m$  - твердість матеріалу.

З формули випливає, що ваговий знос зменшується зі збільшенням твердості матеріалу. Є хороша кореляція між зносостійкістю і ставленням  $H_{det} / f_{ab}$ , де  $H_{det}$  - твердість по Віккерсу;  $f_{ab}$  - фактор, що враховує співвідношення видавленого (зміщеного) і віддаленого матеріалу. Сенса співвідношення  $H_{det} / f_{ab}$  полягає в тому, що зносостійкість тим вище, чим більше здатність металу до максимальної деформації і зміцнення. Вважають, що твердість не є універсальним індикатором зносостійкості, але може мати значення коефіцієнта зносу, знайденого лабораторним шляхом, і грати роль для

визначення груп матеріалу структура яких складається з фаз з різко розрізняється твердістю [43]. Для сплавів на основі Fe з різко відрізняється твердістю запропонована модель еквівалентної твердості, яка заснована на відомому правилі зміщення: еквівалентна твердість дорівнює сумі творів обсягу кожної фракції на твердість. При збільшенні твердості велика частка матеріалу видаляється у вигляді стружки, тому що переважає механізм різання. Для матеріалів еквівалентної твердості, до яких можна віднести гетерогенний. ЛКМ, загальною тенденцією є збільшення опору зношування при більш високих значеннях  $E / \sigma_y$ , де  $E$  - модуль пружності;  $\sigma_y$  - напруження пластичної течії. При постійному значенні  $E$  зменшення  $\sigma_y$  сприяє видавлюванню, що має супроводжуватися меншою інтенсивністю зношування.

Важливим фактором є характеристика структури КМ. На підставі аналізу даних [40], отриманих при терті по моноабразиву (кварцовий пісок, скріплений портланд-цементом марки 700, шляхом пресування) зразків з композиту на основі карбіду вольфраму, можна зробити висновок про те, що виходячи з критеріїв максимальної зносостійкості, в разі зношування в процесі тертя ковзання КМ по монолітному абразиву, оптимальні розміри армуючих гранул повинні знаходитися в межах 0,08-0,22 см. Цей висновок в цілому корелюється з встановленими нами раціональними розмірами сталевих армуючих їх гранул в ЛКМ мідь - сталь [41].

**Аналіз особливостей абразивного зношування стосовно антифрикційним ЛКМ.** Абразивне зношування є однією з найбільш поширених агресивних і яких

важко причин зниження працездатності вузлів тертя машин і устаткування. Процес складається з двох самостійних процесів [31]: 1) впровадження абразивних частинок в стирається поверхню, що характеризується опором матеріалу впровадженню, і 2) процесу «прокопування» поверхні абразивом, що характеризується опором деформації поверхневого шару матеріалу. Отже, для забезпечення високої зносостійкості матеріал повинен одночасно володіти необхідним і достатнім рівнем опору зазначеним обома процесам. На підставі проведених досліджень в роботі [35] зроблено висновок про те, що руйнівний вплив абразивного матеріалу тим менше, чим вище несуча здатність і мікропластичність антифрикційного матеріалу. Ці дані свідчать про перспективність і потенційні переваги ЛКМ, одержуваного на основі пластичних мідних сплавів, армуванням тугоплавкими високомодульними сталевими гранулами, в порівнянні з серійними антифрикційними бронзами або бабітами [22].

Аналіз встановлених в роботі [37] залежностей показав, що в природі абразивного (механічного) зношування лежить характеристика міцності основа. Критерій  $\sigma_b \cdot \psi$  ( $\sigma_b$  - межа міцності,  $\psi$  - відносне звуження) виявився універсальним, що дозволяє пояснити відмінність в зносостійкості сталей при рівному значенні характеристик міцності. Показано, що характеристика міцності складова, «посилена» необхідною пластичністю, є основним визначальним фактором механічного зношування в складних умовах зовнішнього силового впливу, де одночасно з одноразовим контактом одиничної абразивної частинки може проявляється втому від множинних актів такого впливу. При терті твердої частинки по поверхні стали відбувається одночасно її впровадження і подальше переміщення. В результаті формуються продукти зносу і на поверхні утворюється ризик або зминання, орієнтовані по напрямку руху частинки. Впровадження абразивної частинки в метал і її переміщення зустрічає комплексне опір, за який «відповідальні» характеристики міцності і пластичності. Позитивний ефект буде в тому випадку, якщо вказане поєднання механічних властивостей забезпечує необхідний опір:

- впровадження - цю функцію виконує твердість HRC;

- розтягування, зрізу, зім'яту - забезпечується високими значеннями межі міцності, плинності в поєднанні з відносним подовженням, звуженням або різницею  $\sigma_{\text{в}} \dots \sigma_{\text{0,2}}$ . Автори роботи [37] вважають, що «шлях до вирішення цього найважливішого завдання один - створення високоміцних сталей, що мають високі механічні властивості і їх поєднання». Однак з точки зору сучасного матеріалознавства, перспективи підвищення абразивостійкості матеріалів пов'язані не тільки зі збільшенням міцності матричної структури мономатеріала, але і з пошуком нових металокомпозитів, що мають гетерогенну структуру, що складається з фаз, раціонально поєднують властивості міцності, пластичності, теплостійкості і т.д. До таких матеріалів відноситься, наприклад, макрогетерогенний ЛКМ на основі пластичних матриць з мідних сплавів, армованих високомодульних сталевих гранул.

Аналіз наявної інформації показує, що трибологія, незважаючи на наявні успіхи, до сих пір не отримала тієї стадії завершеності, яка дозволила б однозначно обґрунтовано і цілеспрямовано конкретно вирішувати наукові та інженерні завдання, пов'язані з підвищенням зносостійкості деталей машин та інструменту. У великому масиві опублікованих праць з різних питань трибології мало досліджень, що стосуються матеріалознавчих аспектів природи зношування, особливо, коли деталі і вузли тертя працюють в присутності абразивних частинок, що істотно скорочує ресурс надійної роботи найбільш відповідальних ланок механізмів і машин. Особливо це відноситься до порівняно новим, але однозначно перспективним композиційних матеріалів. Практично немає даних про зносостійкість макрогетерогенних ЛКМ системи мідь - сталь при експлуатації в присутності абразивних частинок. Справжня робота покликана заповнити цю прогалину: на основі отриманих фундаментальних даних про вплив особливостей гетерогенної структури на абразивостійкість КМ, визначити перспективні шляхи і можливості підвищення цієї важливої для промислової експлуатації трибовиробів характеристики.

У цьому розділі показані переваги ЛКМ мідь - сталь як підшипникового матеріалу в порівнянні з серійними антифрикційними сплавами, визначені основні

фактори, які впливають на стійкість матеріалу при зношуванні в присутності абразивних частинок, обґрунтовані методики дослідження.



## 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Об'єкти і методика досліджень

#### *Основні об'єкти дослідження*

Об'єктом дослідження є литий композиційний матеріал (ЛКМ) системи мідь - сталь. Як матричних сплавів були обрані мідні сплави, в якості армуючих елементів - сталеві гранули [37].

В якості дискретних абразивів використовували частки алмаза, карбіду кремнію, бору, корунду тощо.

#### **Шихтові матеріали і технологія приготування ЛКМ**

Для виплавки сталі, в якості шихтових матеріалів використовували сталь Ст08кп [3], хром металевий Х39А [4], марганець Мр00 [5], нікель Н-2 [6], алюміній АВ97 [7], мідь М00к [8], цинк ЦВ00 [9]. Застосовували сталевий дріб Алчевського МК [ГОСТ 11964-98; ДСТУ 3184-95].

Як матричного використовували мідні сплави: ливарну латунь [1]; бронзу [2].

Синтез ЛКМ проводили відповідно до інструкції 87.13.25210-00052 ИПЛ НАН України, Технологічною інструкцією ХТО 01-03 на виготовлення виробів із заготовок типу ЛКМ, сталь + ЛКМ, сталь + бронза, 2003р., ВАТ «Іллічівський рудоремонтний завод»; ФТІМС НАНУ. Коротко послідовність операцій: 1) в графітову або металеву ливарну форму засипали попередньо очищені від іржі, промиті і знежирені сталеві гранули, перемішані з боровміщуючим флюсом; 2) зверху на гранули укладали шматки матричного сплаву в кількості необхідній для повного просочення сталевих гранул по всій висоті заготовки; 3) тигель поміщали в підігріту піч і нагрівали до температури 1,1-1,3 Т плавлення матричного сплаву; 3) після витримки для повного просочення матричних сплавом армуючих гранул і охолодження до  $T \leq 2000^{\circ}\text{C}$  ливарну форму витягували з печі.

Щодо хімічного складу сплавів визначали методом спектрального аналізу.

Для обробки армуючих елементів і захисту від окислення розплавом матриці при синтезі ЛКМ використовували флюси ПВ201, ПВ284Х [10], або буру [11], борну кислоту [12] і аргон [13].

Для виготовлення ливарних форм використовували графіт марки МГП ТУ-48-20-51-84 і скло рідке [14] або сталеві труби.

В процесі виплавки, розпилення, синтезу і формування ЛКМ температуру контролювали платиновим термоелектричним перетворювачем ТПП 0679-01, ТУ25.792301-80 хромель-алюмелеві термоелектричними перетворювачами ТХА 0179 ТУ25.02.792289-80 з вторинними приладами КСП-2-042, ТУ25.1610.001-82, КСП-2 ТУ25.1610.001-82, ПДА-1 ТУ25.7424.021-86. При вимірюванні температури в інтервалі 20...1000С відносна похибка становила 1,5%, в інтервалі 150...5000С - 0,8%; а в інтервалі 600...14000С - 0,5% [15].

### **Підготовка зразків для проведення досліджень**

Зразки виготовляли механічною обробкою на металорізальних верстатах. При отриманні зразків вживали заходів, що виключають можливість зміни властивостей металу при нагріванні або наклеп, що виникають в результаті механічної обробки (охладження, відповідні режими обробки). Ось зразка при виготовленні збігалася з віссю заготовки або відливання, з якої виготовляли зразок.

Зразки для випробування на стиск металів виготовляли з точно паралельними торцями діаметром 10 мм, висотою 30 мм.

Для випробувань на ударний вигин зразки мали квадратний перетин 10x10 мм, довжина 55 мм. Для випробування композиційних матеріалів використовували зразки без надрізу [17]. Шорсткість поверхні зразків після механічної обробки Rz була не більше 40 мкм.

Для визначення коефіцієнта лінійного термічного розширення

використовували зразки циліндричної форми діаметром 5 ... 6 мм, довжиною 50 ... 54 мм.

Зразки для випробувань на зносостійкість були виготовлені циліндричної форми висотою 15 мм, діаметром 10 мм.

Для вимірювання твердості по Віккерсу мінімальна товщина зразка була для сталевих виробів більше діагоналі відбитка в 1,2 рази; для виробів з кольорових металів - в 1,5 рази.

Для вивчення структури ЛКМ виготовляли шліфи розміром не менше 3 мм з ретельно відполірованою і протравленою поверхнею. Вирізали також темплети з таким розрахунком, щоб контрольоване перетин знаходилося на відстані, яка виключає вплив умов різання [18].

## 2.2 Дослідження структури ЛКМ

Металографічний аналіз проводили на мікроскопах «Неофот-2» при збільшенні від 10 до 320, МІМ-9 при збільшенні 100, 200 (об'єктив -10; окуляр - 10, 20). Фотографування структур здійснювали при різних збільшеннях [19].

Мікро рентгеноспектральний аналіз був проведений на установці Ремм-102. Визначення хімічного складу фаз і зони взаємодії компонентів ЛКМ проводили локально (діаметр зонда 1 мкм).

## **Визначення фізико-механічних властивостей ЛКМ**

В основі проведення дослідження термічного розширення лежить методика аналізу дилатометричних кривих розширення зразків композитів і вихідних сплавів. Температурну залежність розширення зразків визначали на двох установках: вертикальному кварцовому дилатометрі типу ДКВ. Досліди виконували в динамічному режимі при швидкості підйому температури 5-6 град / хв.

Вимірювання температури здійснювали за допомогою хромель-алюмелеві термопари, підключеної до показуючи потенціометра марки Ш4500, а подовження зразка фіксували показниками індикатора годинного типу. Коефіцієнт лінійного термічного розширення розраховували за формулою:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta t}, 1/\text{град} \quad (2.1)$$

де  $\Delta l$  - абсолютне розширення зразка;

$l_0$  - початкова довжина зразка;

$\Delta t$  - різниця температур вимірюваної і початкової.

Випробування на стиск виробляли на розривної машині Р5 із зусиллям 1-5 тс. При випробуванні контролювали дотримання одновісного стиску.

Випробування на ударний вигин проводили на маятниковому копрі КМ-30 ТУ25.06.1428-78. Зразок вільно лежав на опорах копра, температурою випробування вважали температуру зразка в момент удару, для забезпечення необхідної температури випробування зразки перед установкою на копер переохолоджуватися чи перегрівався [17].

Ударну в'язкість (КС) в Дж / см<sup>2</sup> обчислюють за формулою:

$$KC = K/S_0, \quad (2.2)$$

де  $K$  - робота удару, Дж;

$S_0$  - початкова площа поперечного перерізу зразка, см.

Метод визначення твердості по Бринеллю [20] заснований на тому, що в плоску поверхню металу під постійним навантаженням  $P$  (Н) вдавлюється твердий сталевий кулька. Після зняття навантаження у випробуваному металі утворюється відбиток (лунка). Для визначення твердості вимірювали діаметр лунки і знаходили у ній число твердості по Бринеллю (НВ) за таблицями [21].

Твердість по Роквеллу [20] визначали за глибиною відбитка. Наконечником

(індентором) служив алмазний конус з кутом при вершині 1200 або сталевий загартований кульку. Конус і кулька вдавлювали двома послідовними навантаженнями; попередньої  $P_0 = 100\text{Н}$  і загальної  $P = P_0 + P_1$ , (де  $P_1$  - основне навантаження). Основне навантаження становила 900Н для кульки (шкала В), 1400Н для алмазного конуса (шкала С) і 500 Н [22]. Твердість по Роквеллу вимірювали в умовних одиницях. За одиницю твердості прийнята величина, відповідна осьовому переміщенню наконечника на 0,002 мм. Значення твердості відразу зчитували за шкалою приладу.

Твердість визначали на твердоміра ТК-2, ТМП-4 ТУ25.06.845-76.

Вимірювання лінійних розмірів проводили лінійками [24], штангенциркулем [25], мікрометрів [26] і мікроскопом інструментальним [27].

### **Методика триботехнічних випробувань**

Триботехнічні випробування проводили на машині тертя МТ-68 і 2070 СМТ-1 [28].

Машина тертя МТ-68 дозволяє проводити випробування на тертя і зношування при швидкостях ковзання 0,5 ... 50 м / сек, тисках 2 ... 500 кг / см<sup>2</sup> в різних умовах і при наявності двох видів взаємного переміщення сполучених поверхонь.

Основною частиною машини є вузол тертя з пристосуваннями для одночасного і незалежного вимірювання лінійного зносу пари тертя, сили тертя осі обертального і зворотно-поступального руху і температури в зоні тертя.

Змінне контртіло (ролик) 2 (рис. 2.1 [28]) закріплюється на валу шпинделя 1, який отримує обертання від електродвигуна постійного струму (з регульованим числом обертів) через клиноременну передачу.

Супорт 4 разом з розташованим на ньому вузлом тертя 16 і механізмом зворотно-поступального руху з приводом мають можливість переміщатися по напрямних станини за допомогою маховика 5, шестерні 18 і рейки 17.

Вузол тертя являє собою рухливу каретку (камеру), на бічних стінках якої закріплені криволінійні напрямні 9, співвісні валу шпинделя. По напрямних може

обкатуватися коливається каретка 8, на якій змонтовано навантажує пристрій 15, що представляє собою пневмоциліндр з поршнем.

До поршня за допомогою цангового затиску 3 кріпиться випробуваний зразок. З пневмоциліндром жорстко пов'язаний індуктивний датчик 14 для виміру сумарного лінійного зносу пари тертя, шток якого впирається в важіль поршня.

Пружина 6 перешкоджає переміщенню хитається каретки під дією сили тертя, обумовленої обертанням контртіла (ролика), а індуктивний датчик 7, заміряє деформацію пружини, дозволяє визначити цю силу.

Зворотно-поступальний рух зразка щодо контртіла (ролика) створюється за допомогою низькообертового електродвигуна (з регульованим числом обертів), черв'ячного редуктора 10 і кривошипного механізму 11.

Кривошип пов'язаний з вузлом тертя за допомогою пружного силовиірюючого елемента - плоскою пружини 12. Деформація пружини змиритися індуктивним датчиком 13, що дозволяє при відповідній тарировці визначати сили тертя, що виникають внаслідок зворотно-поступального руху.

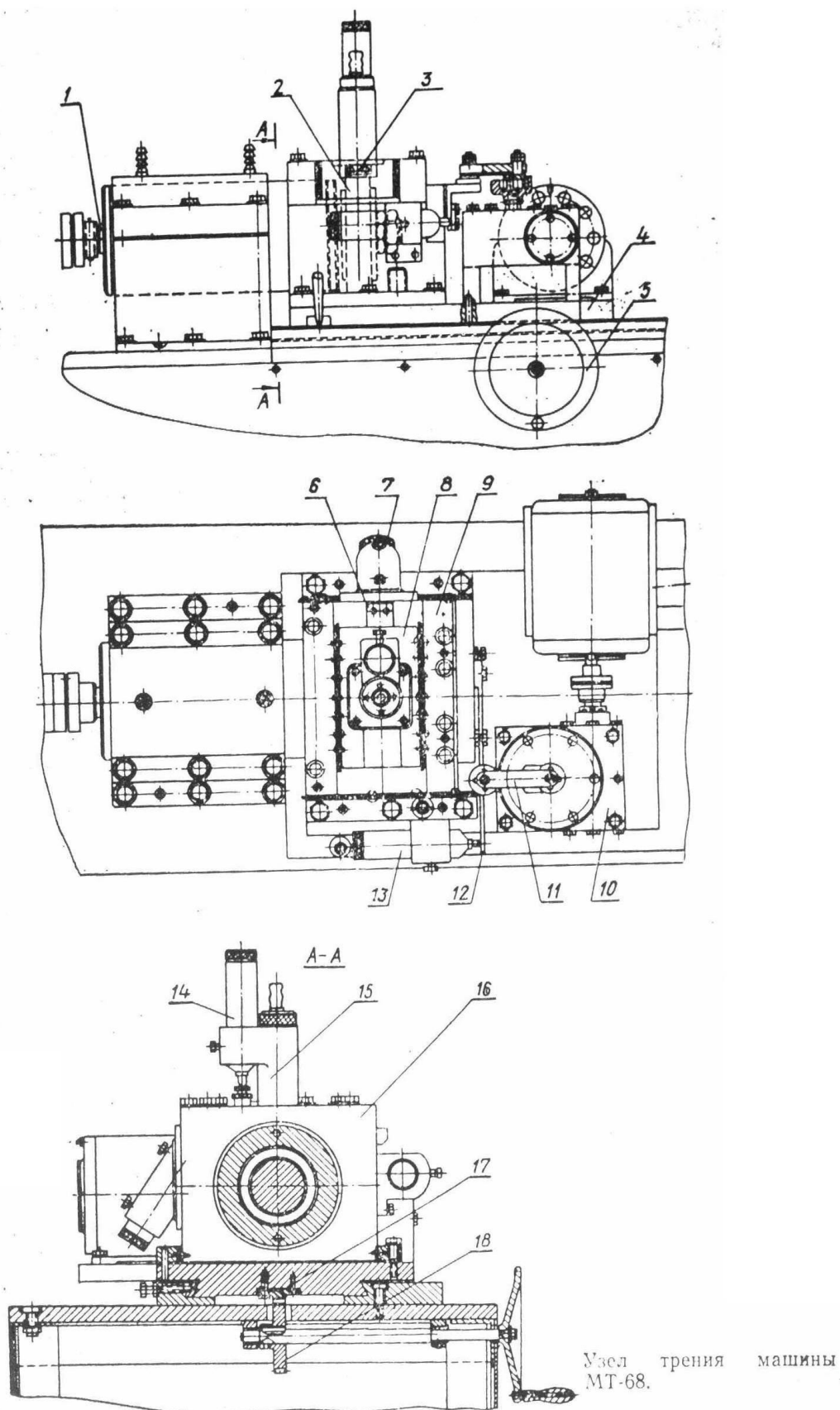


Рисунок 2.1 - Схема машины MT-68 для вивчення триботехнічних характеристик ЛКМ [28].

Зміною напруги в обмотках збудження або якоря здійснювали плавне регулювання в широкому діапазоні швидкостей обертання контртіла, що дало змогу дослідити процеси тертя при різних швидкостях ковзання.

Автоматичний запис лінійного зносу, сили тертя осі обертального і зворотно-поступального руху здійснювали самописцем, які отримують електричний сигнал від датчиків 13 і 14.

Температуру пари тертя вимірювали за допомогою термопари, що поміщається на відстані 0,25 ... 0,3 мм від поверхні тертя, і потенціометра.

Машина 2070 СМТ-1 [29] призначена для випробування матеріалів на тертя і знос, для вивчення процесів тертя і зносу матеріалів, сплавів і жорстких конструкційних пластмас.

На машині проводили випробування з різними зразками, навантаженнями і частотою обертання зразків, а також коефіцієнтами прослизання. Крім того робота велася як в камері з різними мастилами, так і без камери.

Загальними операціями до установки образів були:

- встановити діапазон частоти обертання зразків, яку виробляють, змінюючи шків на електродвигуні згідно з маркуванням на шківі і таблиці на кришці;
- установка необхідного шпинделя;
- підключення води для охолодження підшипників каретки і шпинделя;
- підготовка до роботи електрообладнання.

Принцип дії машини полягає в стиранні пари зразків, притиснутих один до одного силою  $F$ . У процесі роботи в нижньому зразку вимірюють момент тертя.

Взаємозв'язок всіх вузлів і механізмів машини представлена на кінематичній схемі машини (рис. 2.2 [29]).

Електродвигун 38 через зубчастий ремінь 5 обертає шків 3 і 6. Шків 3 через запобіжний штифт 4, вал 39, муфту 9, датчик моменту 10, муфту 12 обертає вал бабки 14, на якому встановлюють зразок 27. Шків 6 через вал 8, кулачкову муфту 11, вал 16, шестерні 23 і 24 обертає вал каретки 25, на якому встановлюють зразок 26.

Зразки 26 і 27 притискаються один до одного силою пружини 33. Величину



сили навантаження регулюють віссю-гвинтом 29, який передає навантаження на зразки через п'яту 30, кронштейн 28 і корпус каретки 22, можлива передача навантаження через важіль випробувальної камери.

В процесі роботи на машині вимірювали момент тертя - сигнал надходить з датчика моменту 10; зусилля навантаження на зразки - датчиком навантаження 36 є прицизійний опір; швидкість обертання валу 14 - датчиком швидкості 37 є тахогенератор. У процесі роботи відбувається відлік числа циклів нижнього зразка - датчиком числа циклів 2 служить безконтактний вимикач.

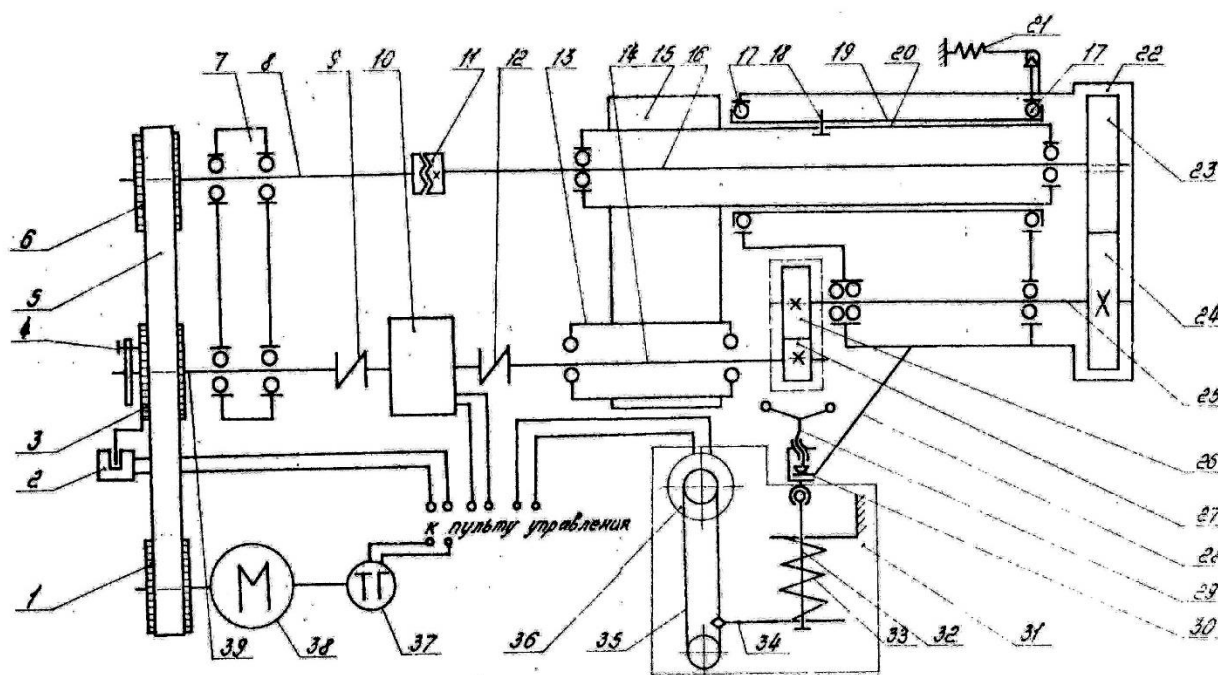


Рисунок 2.2 - Кінематична схема машини 2070 СМТ-1 [29].

1 - шків змінний; 2 - датчик числа циклів; 3 - шків; 4 - штифт запобіжний; 5 - ремінь зубчастий; 6 - шків змінний; 7 - корпус; 8 - вал; 9 - муфта; 10 - датчик моменту; 11 - муфта кулачкова; 12 - муфта; 13 - шпindel змінний; 14 - вал бабки; 15 - баба нижнього зразка; 16 - вал; 17 - підшипник; 18 - фіксатор; 19 - стакан; 20 - труба; 21 - пружина урівноважує; 22 - каретка; 23, 24 - шестерня; 25 - вал каретки; 26, 27 - зразок; 28 кронштейн; 29 - вісь-гвинт; 30 - п'ята; 31 - механізм навантаження; 32 - тяга; 33 - пружина; 34 - планка; 35 - нитка; 36 - датчик навантаження; 37 - датчик швидкості; 38 - електродвигун; 39 - вал.

Діапазон частоти обертання валу нижнього зразка змінювали, змінюючи змінний шків 1. Частоту обертання в межах діапазону змінювали за допомогою електродвигуна 38.

## **Методика дослідження зношування при терті матеріалів про закріплений абразив**

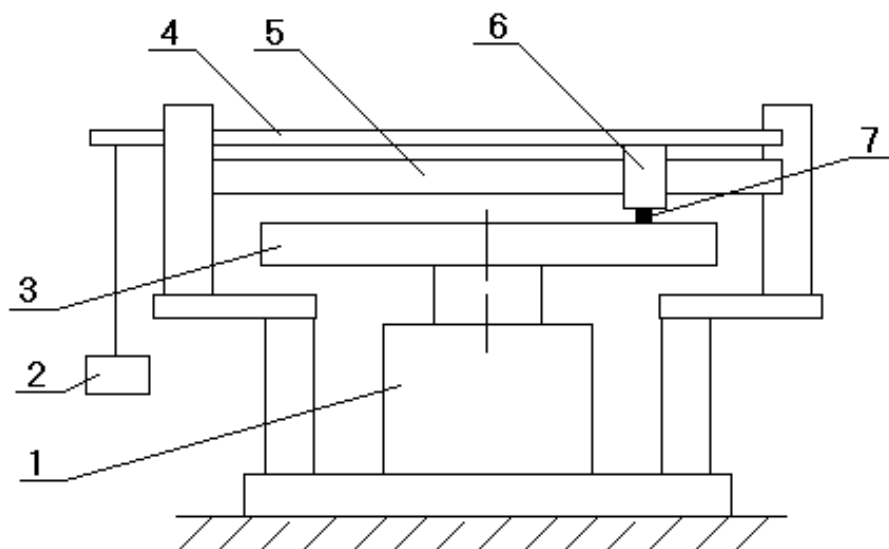
Тертя про абразивну поверхню шкірки здійснювали за двома кінематичними схемами: 1) шкірка закріплюється на циліндричній поверхні барабана, що обертається, а зразок притискається до неї; 2) шкірка закріплюється на плоскій стороні диска, що обертається, і при його обертанні стирається торець зразка. При проведенні справжніх досліджень використані обидва варіанти випробувань.

Досліди на абразивне зношування по другому типу проводили згідно ГОСТ 17367-71 на випробувальній установці ФТМС НАНУ.

Схема установки ЛКИ-3 зображена на рис. 2.3, 2.4. Асинхронний двигун 1 через редуктор передавав обертальний рух на центральний вертикальний вал з диском 2. На цьому диску закріплювали шліфувальну шкірку, яка оберталася разом з ним. Зразок фіксували в тримачі 3, як показано на рис. 2.3. Тримач забезпечував вільний рух зразка в осьовому напрямку. В отвір на нерухомому мосту машини 4 встановлювали держатель таким чином, щоб зразок торцем спирався на шкірку. Всього в мості є шість таких отворів. Кожному з них відповідає певний діаметр окружності, по якій відбувається трибоконтакт зразка і абразиву. Постійна швидкість обертання валу забезпечує певну швидкість ковзання на контакті зразок - абразив, яка обумовлюється обраним методом встановлення зразка. Навантаження на досліджуваний зразок створювали за допомогою важеля 5 і гирь, що встановлюються на площадку підвіски 6. Загальний вигляд установки представлений на рис. 2.4.

З заготовок ЛКМ виготовляли зразки розміром 10x10x15 мм. Поверхня зразків, призначену до абразивного зношування, шліфували на шліфувальній шкірці (марки 320к, зернистістю 80 мкм) на шліфувальному верстаті до зникнення слідів механічної обробки, що виникають при виготовленні зразків (глибокі ризики, нерівності та ін.). Потім проводили пришліфовкою зразків на випробувальній установці на шкірці з маркою, що відповідає умовам подальших випробувань.

Готовність зразка до проведення випробувань оцінювали візуально. Безпосередньо перед випробуваннями зразки очищали від пилу і бруду, протирали сухою тканиною, спиртом, після чого висушували. Визначали вага на аналітичних вагах з ціною поділки 0,0001. випробування проводили в нормальних кліматичних умовах, без застосування мастильно-охолоджувальної рідини. Використовували водостійку шліфувальну



- де 1 - двигун з редуктором;
- 2 - вантаж на підвісці;
- 3 - обертовий диск із закріпленою абразивною шкіркою;
- 4 - важіль, що передає навантаження на зразок;
- 5 - нерухома штанга до якої кріпиться тримач зразка;
- 6 - тримач із зразком;
- 7 - зразок.

Рисунок 2.3 - Схема установки для випробувань на зносостійкість при терті про закріплений абразив:



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд установки ЛКИ-3 для випробувань матеріалів при зношуванні закріпленням абразивом.

шкурку на тканинній основі з шліфувальним матеріалом - корундом і карбідом кремнію. Нормальний електрокорунд мав зернистість 50...100 мкм, а чорний карбід кремнію 150...180 мкм. Випробування проводили при швидкості обертання диска 0,19 м / с і навантаженні 4,6 кг / см<sup>2</sup>.

На першому етапі випробувань здійснювали приробітку. Для цього виконували послідовні дослід зношування кожного виду зразків протягом 10 секунд, визначаючи зміна його ваги. При цьому кожен раз використовували свіжу шкурку. Час контролювали секундоміром. Будували графік «втрата ваги - час», визначаючи момент стабілізації зносу. Встановлений час початку стабілізації було показником, за яким визначали тривалість проведення порівняльних випробувань ЛКМ і моносплава або еталона. Положення зразка відносно напрямку руху при випробуваннях збігалось з його розташуванням при заробляння. Випробувані зразки очищали від пилу і бруду і зважували. За отриманими результатами зважування визначали середнє арифметичне значення змін ваги. Величину зносу розраховували за формулою:

$$I = \Delta m / l \cdot S, \text{ мг/км} \cdot \text{см}^2 \quad (2.3)$$

де  $l$  - шлях тертя, км;

$S$  - площа стирання зразка,  $\text{см}^2$ ;

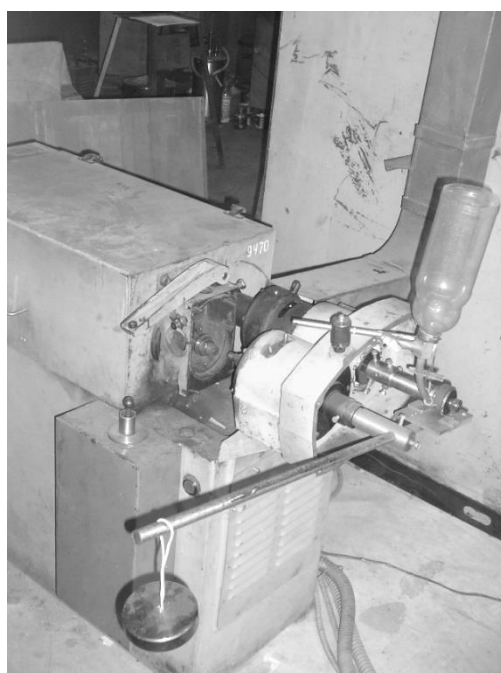
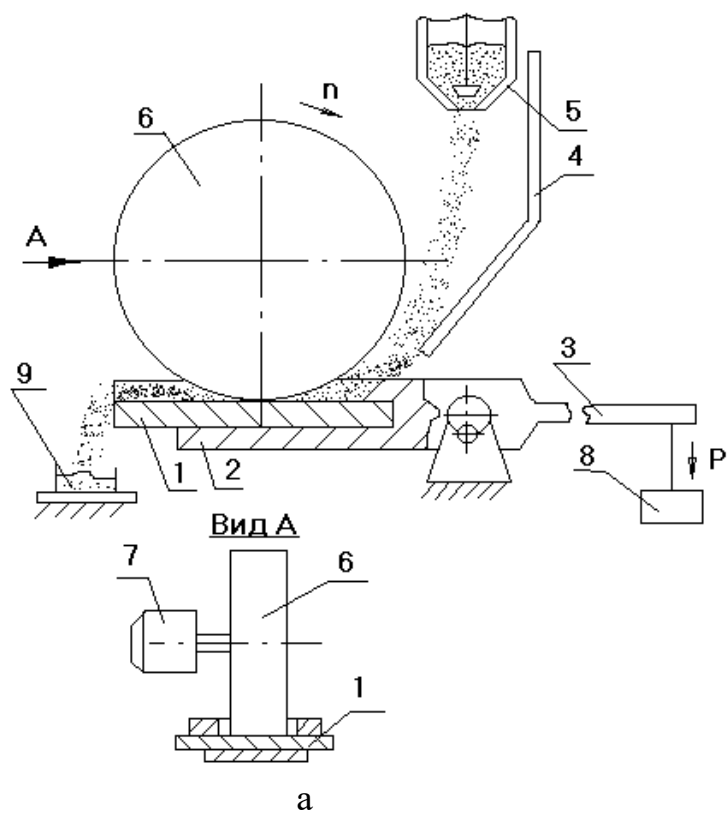
$\Delta m$  - зміна ваги зразка, мг.

Випробування ЛКМ і моносплавів на абразивне зношування закріпленим абразивом проводили також при терті ковзанні. Стирається поверхнею служили шліфувальна шкірка і шар алмазних частинок. Досліди виконували на машинах тертя, що працюють за відомою схемою: контртіло (обертовий диск) - навантажується зразок. Властивості випробовуваних матеріалів визначали на повітрі без подачі мастила в зону тертя. Зразки мали діаметр 10 мм, а довжину 15...20 мм. На машині МТ-68 контртіло служило кільце діаметром 100 мм шириною 20 мм з нанесеним шаром алмазних частинок зернистістю 125/100 на зв'язці Б1. Тиск на контакті становило 2,5 кг /  $\text{см}^2$ , а швидкість ковзання 2 м/с. Знос оцінювали за втратою маси зразком, віднесеної до площі поверхні стирання за пройдений шлях (формула 3.3).

При проведенні експериментів на машині 2070 СМТ-1 на сталеве контртіло була укріплена шліфувальна шкірка з частинками карбіду кремнію зернистістю 150...180 мкм. Випробування виконували при навантаженнях 15 і 20 кг /  $\text{см}^2$ , без подачі мастила в зону тертя при швидкості ковзання 0,2 м/с.

### **Методика вивчення зношування при терті об абразивну прошарок**

Для проведення випробувань ЛКМ була обрана схема по ГОСТ 23.208-79 (рис. 2.5). Прийнятий метод визначення зносостійкості матеріалів при терті в присутності вільного абразиву збігається з польським стандартом і близький до американського методу по стандарту ASTM C 6585 [32, 33].



б

а - схема установки;

б - загальний вигляд установки.

Рисунок 2.5 – Установка для випробування на абразивну стійкість при терті об абразивну прошарок:

Випробувальна установка (рис. 2.5 а.) Містить привід 7, що забезпечує обертання навколо горизонтальної осі гумового ролика 6. Зразок 1, встановлюваний в утримувач 2, притискається до ролика за допомогою важеля 3. Зусилля притиску регулюється важелем і навантаженням, що поміщається на платформу 8. Пристрій 5, дозує подачу абразивних частинок в зону тертя по направляючої лотку 4. Звільнитися з-під ролика частки потрапляє в бункер 9 для збору відпрацьованого абразивного порошку. Ролик має діаметр 52 мм і ширину 15,6 мм. Завдяки тому, що він виконаний з гуми, яка має хорошою піддатливістю, яка забезпечує відносну свободу переміщення абразивного порошку в зоні контакту тертя, ця конструкція дозволяє здійснювати імітацію зношування про нежорстко закріплений абразив.

При проведенні випробувань як абразиви використовували пісок (зернистістю 100...160 мкм) і частки карбїду кремнію (зернистістю 80...100 мкм).

З ЛКМ і моносплавів виготовляли зразки у вигляді пластин розміром 30x30x5 мм. Перед проведенням випробувань поверхню зразків, призначену до зношування, шліфували до зникнення слідів механічної обробки, що виникають при їх виготовленні. Підготовлені зразки встановлювали в утримувач, включали привід обертання ролика і дозуючий пристрій, одночасно відзначаючи час включення секундоміром. Тривалість дії абразивних порошоків становила 4, 8, 12 хв. Навантаження 4,5 кг, 10 кг і 15 кг. Після закінчення випробувань зупиняли привід, знімали навантаження, звільняли зразок, промивали його, висушували. Знос визначали ваговим методом, зважуючи зразки до і після випробувань на аналітичних вагах з точністю до 0,0001г. За отриманими даними будували графіки та діаграми залежності величини зносу від шляху тертя і навантаження.

### **Методика вивчення зношування при терті об абразивну сипучу масу**

У роботі використовували спосіб «гільзи», що дозволяє відтворювати тонкий процес зношування матеріалу в сипучої маси частинок різної природи, твердості, форми, розмірів, запропонований В.Ф. Лоренцем [34]. Схема такого випробування

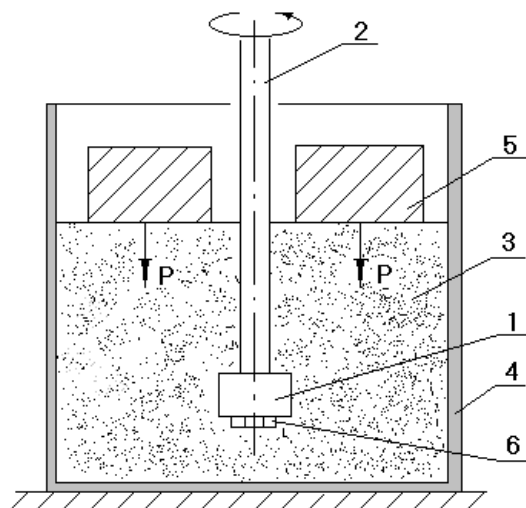
представлена на рис. 2.6.

Зразок 1 (у вигляді короткого циліндра), закріплений на кінці валу, що обертається 2, знаходиться під впливом сипучого абразиву 3, що заповнює посудину 4. Ущільнення абразивної маси досягається за допомогою диска 5, лежачого на її поверхні. Вертикальний стержень із закріпленим на його нижньому кінці зразком, має можливість переміщатися в вертикальному напрямку. Зразок встановлюють на вал, закріплюють за допомогою гайки 6 і опускають в посудину з абразивним порошком на задану глибину, яка в проведених дослідках становила 38-40 мм від дна посудини з абразивом.

З заготовок виготовляли циліндричні зразки з однаковими геометричними розмірами: діаметр 20 мм, висота 13 мм. Поверхня, призначену до зношування, шліфували на шліфшкурці до зникнення слідів механічної обробки, що виникають при виготовленні зразків (глибокі ризики, нерівності та ін.). Готовність зразка до проведення випробувань оцінювали візуально. Випробування проводили в абразивної маси частинок піску (зернистістю 100...160 мкм) і карбиду кремнію (зернистістю 80...100 мкм) при швидкостях 800, 1400, 2500 оборотів вала в хвилину протягом 1, 2, 4, 6 годин і навантаженні 3,09 кг. Основною кількісною мірою зношування матеріалу в даних умовах є сумарний знос, який визначається зі зміни маси зразків, що встановлюється ваговим методом. Зразки зважували до і після кожного виду випробувань з точністю до 0,0001 г.

Перед проведенням будь-якого досвіду масу абразивів ретельно перемішували. За отриманими даними будували графіки залежності величини зносу від часу впливу абразивної маси на поверхню досліджуваного зразка.





а



б

а - схема;

б - загальний вигляд установки.

Рисунок 3.6 – Установка для випробування зразків ЛКМ і моносплавів в сипучої абразивної маси.

## Методика проведення трибологічних досліджень методом склерометрії

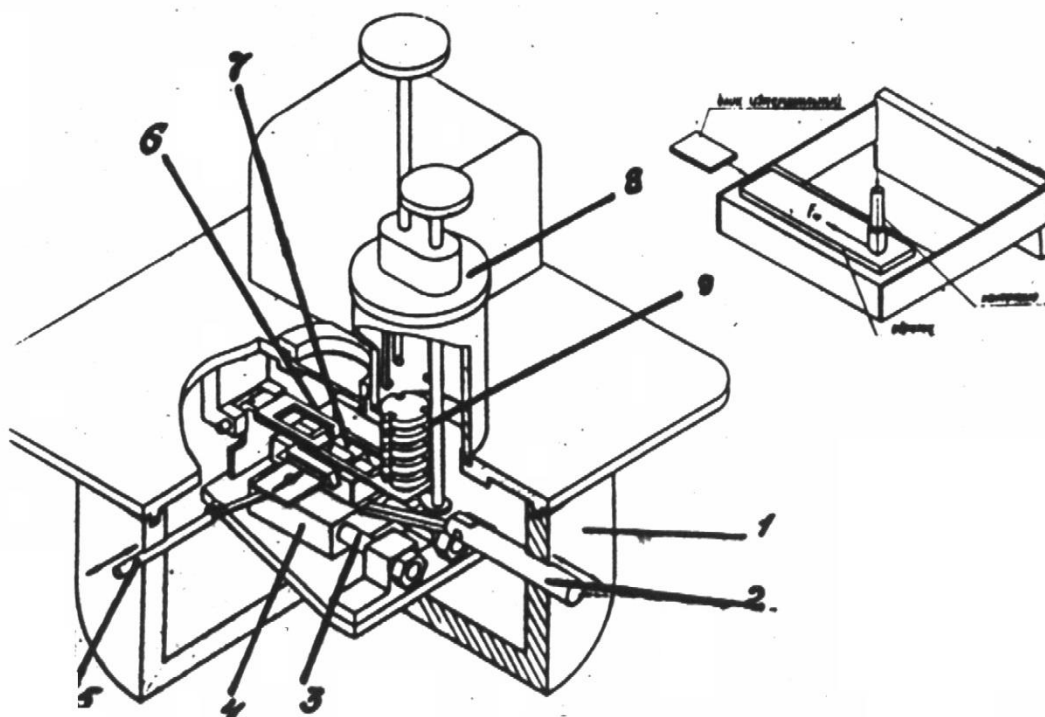
Шліфування різних металевих і неметалевих матеріалів розглядаються, як суму великого числа дряпання твердого (абразивного) тіла за м'якшим. Звідси виникло припущення, що основа зношування металів, зокрема абразивного, лежить процес елементарного дряпання [35]. Процес дряпання металів і мінералів неодноразово вивчали в зв'язку з розробкою випробувань на твердість. Метод дозволяє характеризувати мікротвердість різних структурних складових, виявляти ступінь зміцнення біля кордонів кристалів, характеризувати зносостійкість точніше, ніж вдавнення алмазної пірамідою. Твердість (по Ребиндера П.А.) визначається, як роботу, необхідну для утворення одиниці нової поверхні твердого тіла, при сталості інших факторів, називають склерометричною [35]. Прилади, що дозволяють визначати величину цієї роботи - склерометри. Склерометричні методи засновані на вивченні процесу дряпання, властивостей утворюються подряпин і дозволяють характеризувати абразивне зношування на мікроскопічному рівні [31].

У лабораторній практиці найбільшого поширення знайшли склерометри для визначення твердості. Головною частиною приладу будь-якої конструкції є індентор [31, 36]. Якщо межа пружності твердого тіла менше межі пружності дряпаючого матеріалу, то вістря індентора впроваджується в тіло і видавлює матеріал в сторони, або розділяє його на частини. У різних приладах індентором може бути трьох або чотиригранна піраміда, конус, виготовлений із загартованої сталі ШХ15 і побідитового сплаву, корундова голка. Індентор заточують під кутом 600 або 900. Крім індентора, основними елементами приладів є навантажувач пристрій і пристосування, що забезпечує процес дряпання досліджуваної поверхні. Звідси склерометри можуть бути статичного і динамічного впливу. До склерометри статичного дії відносяться пристосовані до випробувань Мікротвердоміри (ПМТ-3). Вони забезпечені навантажувачем пристроєм і мікроскопом, що дозволяє розглядати характер утворюється подряпини. У цьому варіанті індентор встановлений стаціонарно, а пересувається пластина досліджуваного матеріалу. Якщо переміщається індентор по поверхні зразка, такі прилади є склерометри динамічної

дії. Зазвичай вони митників. Для дослідження металів використовують прилад СТ-4, для дослідження пластмас - СТ-5. [31]. Прилад оснащений маятником, на кінці якого укріплений індентор. При опусканні під дією ваги маятник в нижньому положенні зустрічається з поверхнею зразка, дряпає на ній лунку певної довжини.

Випробування досліджуваних матеріалів (ЛКМ і моносплава) проводили на трибометр ТМ-90, з використанням мікротрибометричної приставки МТП-75 (рис. 2.7, 2.8). Зразок у вигляді пластини розміром 30x17x5 мм встановлювали в приставку, де він кріпився до корпусу 4 плоскими пружинами. За допомогою напрямних системи навантаження установки, через шток 5 корпусу повідомлялося поперечне, а штоком 2 - поздовжнє переміщення. Індентор, виготовлений з булатної сталі, встановлювали в систему важеля 8 з навантажувачем пристроєм, який дозволяє поступово змінювати навантаження на індентор в межах 0,02 ... 0,1 Н. Поступальний рух корпусу може змінюватися в межах 0,03 ... 4200 м / год. Пристрій поперечного переміщення корпусу дає можливість проводити кілька «доріжок» на поверхні одного зразка без його знімання. Випробування проводили при швидкості переміщення зразка 1,5 мм / сек і навантаженнях: 49 г, 150 г та 200 г. Дряпання проводили тільки в одному напрямку. Вимірювання глибини і ширини утворюються подряпин проводили на подвійному мікроскопі Линника (модель МІС-11).

Трибометр, дозволяє з високою точністю проводити випробування на абразивну стійкість матеріалу, імітуючи вплив твердої частинки на поверхню матеріалу в залежності від сили тертя, простежити характер руйнівного дряпаючого впливу одиничної твердої частки.



- де 1 - кожух приставки;
- 2 - шток приводу;
- 3 - напрямні;
- 4 - корпус приставки;
- 5 - привід пристрою поперечного переміщення зразка;
- 6 - індентор;
- 7 - зразок;
- 8 - система важеля;
- 9 - набір вантажів.

Рисунок 2.7 – Схема вузла тертя (а) і мікротриботехнічної приставки МТП-75 (б).

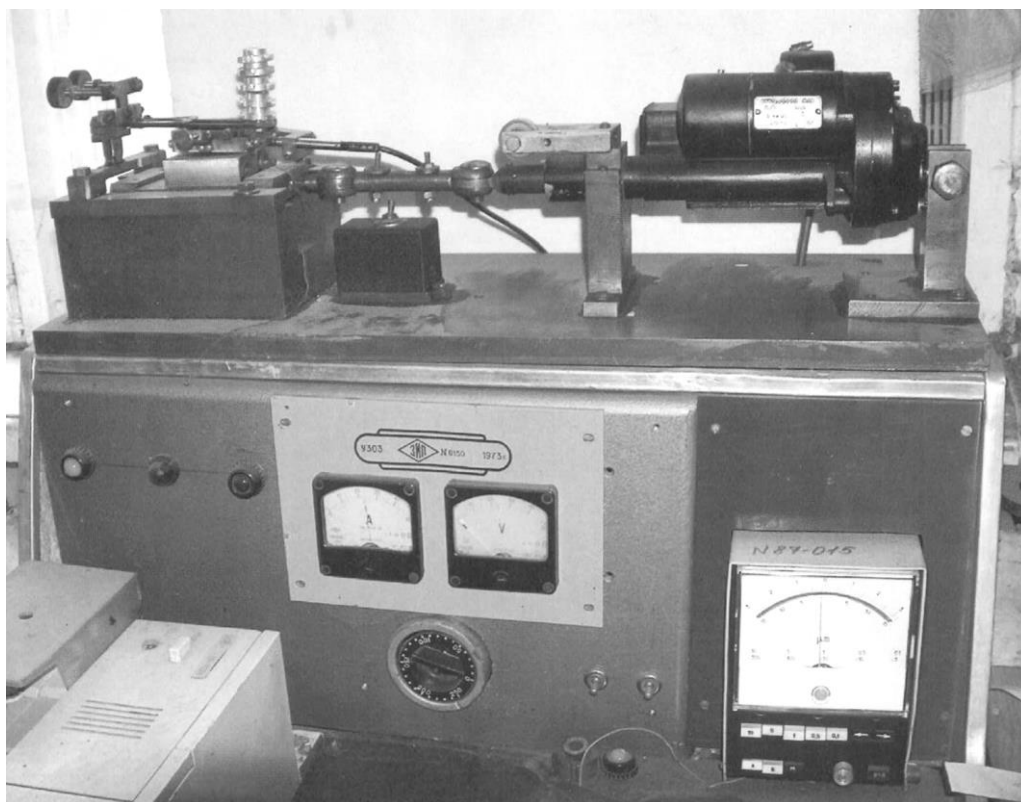


Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд трибометра

### **Стійкість ЛКМ і моносплавів при зношуванні в обсязі сипучого абразивного матеріалу**

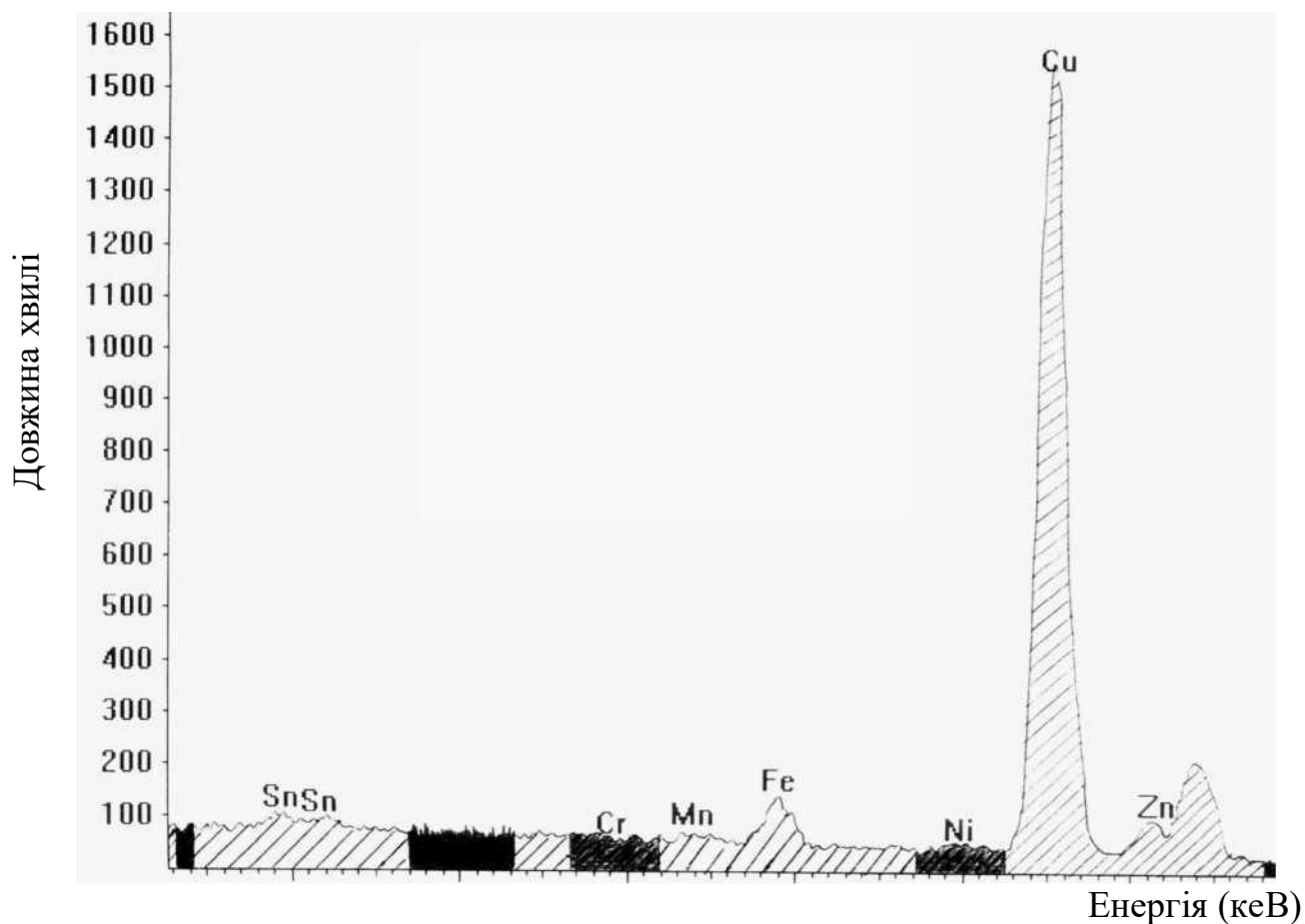
Тверді мінерали можуть представляти неміцно пов'язану, сипучу масу. При терті металу в такому середовищі абразивні зерна переміщуються відносно один одного, а потік незакріплених часток - по поверхні зразка або деталі. Окрема частка власне стирає поверхню тільки 10% загального часу перебування її в трибологічній системі. А решта час вона перекочується [1]. Для подібних умов характерним є порівняно мала інтенсивність зношування металу, так як ковзання деталі по поверхні ущільненої сипучої абразивної маси протікає під відносно невеликий навантаженням. Величина зносу визначається властивостями матеріалу, що піддається зношуванню, і умовами впливу абразивного середовища, в залежності від яких на металі можуть виникати подряпини або ж буде відбуватися полірування. В останньому випадку зношування при терті матиме місце тільки в межах тонкого поверхневого шару [2].

Для деталей, що зношуються в абразивній масі, характерною є залежність

зносу від величини нормальної притискає сили, часу (або шляху тертя), швидкості переміщення виробу щодо абразивного середовища. Не менше значення має природа абразиву, що визначає властивості матеріалу абразивних неметалічних частинок: міцність, твердість, зернистість, форма. Впливає також структура изнашиваємого матеріалу, його фазовий склад і властивості складають фаз. Не виключено вплив окислювальних процесів, що мають місце в період тертя поверхні зразка про сипучу абразивну масу [1, 2, 3].

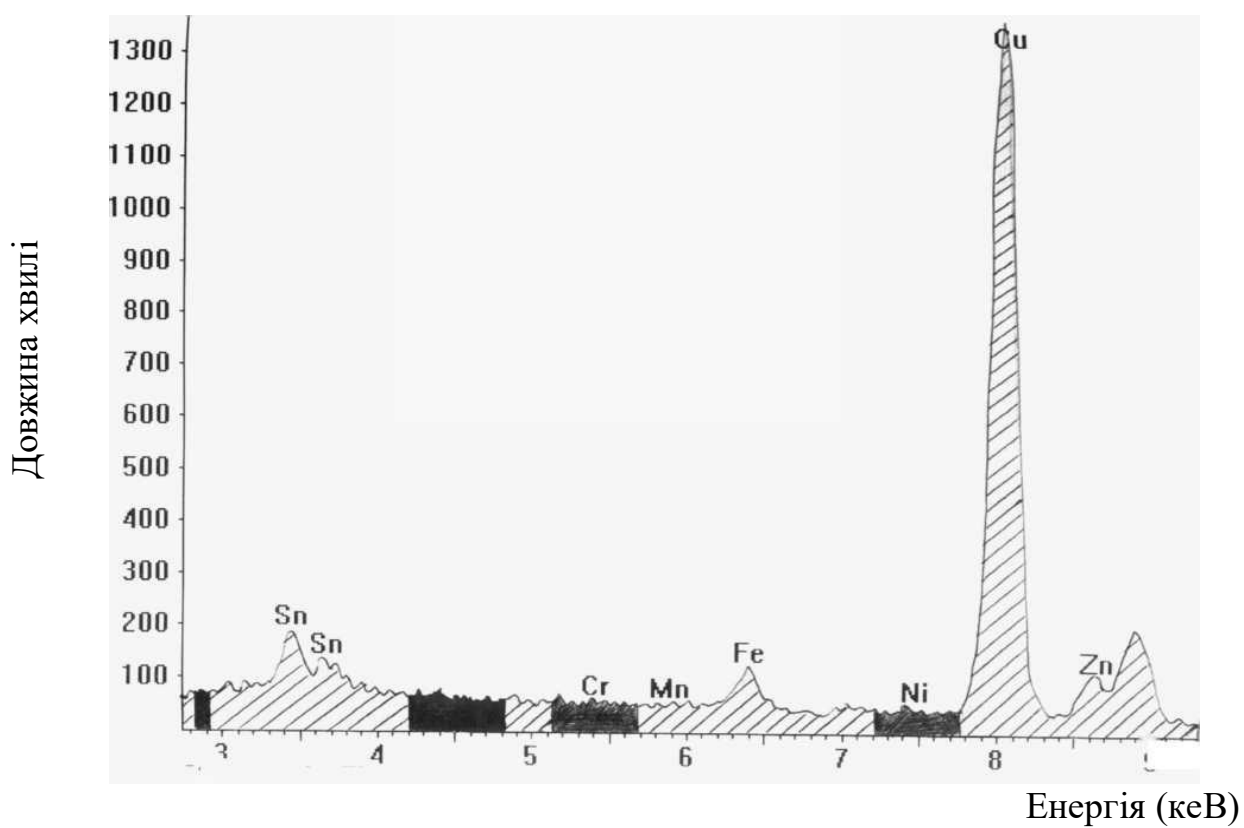
### 2.3 Характеристика випробуваних матеріалів

Для випробувань були відібрані зразки ЛКМ на основі мідного сплаву, армованого гранулами з вуглецевої сталі розміром 0,8...1,2 мм. Використовували зразки в литому стані - після просочення бронзовим розплавом пористої насадки з сталевого дробу. Об'єктами порівняння служили моносплави бронзи, латуні, алюмінію, хімічний склад яких наведено в табл. 2.1. У тій же таблиці представлено склад матриці випробуваних ЛКМ. Гранули в обох зразках ЛКМ №604 і №900 мають ідентичний складу при утриманні (мас.%): С - 0,8 ... 1,0; Si - 0,25 ... 0,29; Mn - 0,65 ... 0,69; Cr - 0,05. Матричний сплав відрізняється (табл. 2.1) присутністю ряду елементів. За допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу було встановлено наявність в цих сплавах олова, цинку і свинцю (рис. 2.9, 2.10). Різниця їх змісту призводить до того, що структура і мікротвердість фаз матриці розглянутих ЛКМ розрізняються (табл. 2.1).



Елемент	Інт.	C%
Al	343	2,65
Si	150	0,41
Cr	-37	0,00
Mn	137	0,50
Fe	968	3,33
Ni	90	0,40
Cu	21153	83,95
Zn	1054	4,65
Sn	287	1,33
Pb	279	2,79
Сума		100,00

Рисунок 2.9 - Спектр рентгенівського випромінювання і зміст елементів в матричному металі ЛКМ №900.



Елемент	Інт.	С%
Al	15	0,12
Si	167	0,47
Cr	13	0,04
Mn	3	0,01
Fe	894	3,36
Ni	119	0,57
Cu	18580	81,50
Zn	1219	6,02
Sn	1239	5,95
Pb	188	1,95
Сума		100,00

Рисунок 2.10 - Спектр рентгенівського випромінювання і зміст елементів в матричному металі ЛКМ №604.



Таблиця 2.1 - Хімічний склад випробуваних матеріалів

Матеріал зразка	Структура компонентів, мас.%									
	Si	Al	Fe	Mn	Ni	Md	Си	Zn	Sn	Pb
Алюміній АК12М2МгН	12,4	Ост.	0,59	0,15	0,8	0,83	1,5	-	-	-
Бронза А9Ж4	0,2	8,81	3,6	0,21	0,27	-	Ост.	0,65	-	-
Багатокомпонента латунь, №1	0,17	0,7 1,3	0,9 1,4	0,26	0,17		68,5	26,0	1,4 1,7	1,86
Багатокомпонента латунь, №2	0,13	0,3 1,5	0,9 1,5	0,37	0,1		68,6	27,0	1,3 1,5	1,48
Багатокомпонента латунь №3		0,5 1,9	1,0 1,6	0,48			61,0	34,0	1,1 1,2	1,27
Матричний сплав ЛКМ №604	0,48	0,12	3,24	0,01	0,4		Ост.	6,08	5,68	1,91
Матричний сплав ЛКМ №900	0,43	2,6	3,12	0,57	0,4		Ост.	4,67	1,35	2,98

Таблиця 2.2 - Дані металографічного дослідження випробуваних зразків ЛКМ

№ обр.	Характеристика гранул			Характеристика матриці	
	діам. мм	структура	Н <sub>μ</sub> 50, кг/мм <sup>2</sup>	структура	Н <sub>μ</sub> 20, аси
ЛКМ 900	0,8-1,2	Перліт, в окремих гранулах точкові включення чорного кольору	сер.348 (286...412)	α тв. розчин, дрібні (1-5 мкм) точкові включення залістистої фази, включення свинцю розміром до 5 мкм.	сер.179-186 (161...210)
ЛКМ 604	0,8-1,2	Перліт, невелика кількість Ферита. У деяких гранулах по межах зерен багато точкових включень	сер.399 (342...449)	α тв. розчин, множинні кристалізаційні пори, од. включення свинцю	сер.230 (200...258)

Є відмінності і в мікротвердості гранул. Все це впливає на показники абразивного зношування при випробуванні зразків.

У табл. 2.3 представлений фазовий склад і мікротвердість фаз, що складають структуру матеріалів порівняння - моносплавов бронзи, латуні, алюмінію. З розгляду цих даних видно, що найбільш м'яким є алюміній. Використовувані три види латуні викриваються змістом ряду елементів, присутність яких в сплавах

призводить до відмінностей в фазовому складі і властивостях матеріалів.

Змінюється зміст а і в фаз, їх твердість, що позначилося на показниках зносу при дії абразивного середовища.

#### 2.4 Залежність абразивного зношування від властивостей випробуваних матеріалів і природи абразивних частинок

Одним з важливих питань, що мають принципове значення у встановленні абразивостійкості, є залежність зношування від структури і властивостей матеріалів, а також від властивостей і природи абразивних частинок: форми, твердості, міцності, зернистості.

Починаючи з перших досліджень, абразивний зносостійкість матеріалів зіставлялася з твердістю при вдавлюванні індентора, так як твердість була і залишається широко використовуваним інформативним показником механічних властивостей поверхневого шару трібодеталі. У той же час, дослідження показали, що при зношуванні металів і композитів в сипучої абразивному середовищі залежність зносу від твердості абразивів якісно подібна аналогічним залежностям для закріпленого абразиву і абразивної прошарку [1, 2]. Однак в кількісному відношенні спостерігається істотна відмінність, що пов'язано з умовами дії абразивів і їх властивостями. У практичному відношенні для опису впливу цих факторів на показники опору матеріалів зносу був використаний коефіцієнт твердості  $K_T$ , який визначається співвідношенням твердостей матеріалу і впливає абразиву [4]. Для обраних ЛКМ і моносплавов були проведені розрахунки  $K_T$ , з урахуванням особливостей їх структури. Використовували середні значення мікротвердості фаз, їх процентний вміст, а також середні значення мікротвердості абразивних порошків - середовища випробування: частинок піску і карбіду кремнію [5, 6]. Отримані результати представлені в табл. 2.3.

Як видно з розглянутих даних найменше значення  $K_T$  має алюміній, що свідчить про найбільшу руйнує здатності абразиву і відповідно низькою стійкості матеріалу. Багатокомпонентні латуні відрізняються хімічним складом (табл. 2.1) і

твердістю фаз (табл. 2.3). Твердість а фази латуні №2 вище, ніж у латуні №1. Відповідно різні значення  $K_T$  у цих сплавів (табл. 2.1). М'яка латунь має більш низькі значення коефіцієнта твердості, як в порівнянні з частками піску, так і карбіду кремнію. Це позначилося на показниках абразивостійкості: знос цього сплаву вище, що відповідає меншим значенням  $K_T = H_{\text{мет}} / H_{\text{абр}}$  (рис. 2.3). У бронзи, мікротвердість фаз якої наближається до твердості фаз латуні №2, коефіцієнт твердості має близькі до цього сплаву значення. І показники зносу у бронзи також наближаються до даних втрат ваги латуні №2. Таким чином, можна констатувати наявність відповідності величини зносу моносплавів значенням коефіцієнта твердості. Чим він нижчий, тим більше втрати ваги зразків при ідентичних умовах випробувань в абразивної маси. Це пов'язано з підвищеною мікротвердістю абразивних частинок, щодо антифрикційного матеріалу.

Таблиця 2.3 - Результати металографічного дослідження зразків моносплавів

Матеріал зразка	Структура	Характеристика фазового складу										
		$\alpha_{Cu}$ тв. розчин		Эвтектоїд $\alpha_{Cu}+\gamma_2$		$\gamma Fe$		$\alpha$		$\beta$		Al H $\mu$
		сод. %	H $\mu$	сод. %	H $\mu$	сод.	H $\mu$	сод. %	H $\mu$	сод. %	H $\mu$	
Алюміній AK12M2MgH	Дендрити алюмінієвого розчину (Al), пластинки первинного кремнію, а і в залізисті фази											сер. 74 (68... 89)
Бронза АЖ 9-4	$\alpha_{Cu}$ твердий розчин, евтектоїд $\alpha_{Cu}+\gamma_2(Cu_9Al_4)$ , твердий розчин, евтектоїд	79-80	сер. 155 (127... 165)	19-20	сер. 202 (183... 243)	1-2	сер.633 (515... 758)					
Багатокомпонента латунь №1	$\alpha+\beta$ фази. Свинець у вигляді точкових включень і смужок навколо $\beta$ - фази .							88-89	сер. 125 (114... 136)	10	сер. 263 (247... 287)	
Багатокомпонента латунь №2	$\alpha+\beta$ фази. Дрібні включення свинцю							85-90	ср. 172 (153... 187)	10-15	сер. 206 (200... 224)	
Багатокомпонента латунь №3	$\alpha+\beta$ фази. Дрібні включення свинцю, зірчасті включення залозистої фази розміром 10-20 мкм,					До 1,0	сер.581 (515... 645)	20	110	80	167	

Таблиця 2.4 - Значення коефіцієнта твердості ( $K_T$ ) для моносплавів і ЛКМ, при випробуваннях в піску і порошку карбиду кремнію

Матеріал		Значення $K_T$ для абразивів	
		пісок	карбід кремнію
ЛКМ №604	Гранула	0,33	0,12
	Матриця	0,19	0,07
ЛКМ №900	Гранула	0,289	0,1
	Матриця	0,154	0,057
Бронза А9Ж4		0,14	0,05
Багатокомпонента латунь №2		0,137	0,05
Багатокомпонента латунь №3		0,12	0,04
Багатокомпонента латунь №1		0,11	0,04
Алюміній АК12М2МГН		0,061	0,02

Інакше поводяться композиційні матеріали. Для ЛКМ більшого значення набуває структура матеріалу, так як вона не є однорідною. Тверді армуючі складові, сталеві гранули, займають 50...70% обсягу ЛКМ. Знаходяться вони в матричному металі, в порівнянні зі сталевими елементами, що мають меншу твердість. При цьому, в різних ЛКМ гранули і матриця можуть мати різну твердість. Прикладом є ЛКМ використовуваних складів: №604 і №900 (табл. 2.1). Гранули в цих ЛКМ ідентичного складу мають різну структуру і твердість (табл. 2.2). Матричний сплав також відрізняється складом і твердістю. У ЛКМ №604 твердіші гранули і матриця, відповідно вище, ніж у ЛКМ №900 значення  $K_T$ . Випробування показали, що композиційний матеріал з більш твердими гранулами і матрицею характеризується меншим зносом. Для матеріалів, що складаються з фаз різко мідь + сталь, вдаються до яких слід віднести ЛКМ порівняння т.зв. еквівалентної твердості, яка визначається за твердістю яка різко розрізняється, до яких слід віднести ЛКМ мідь + сталь, вдаються до порівняння т.зв. еквівалентної твердості, яка визначається за принципом адитивності (змішування). Еквівалентна твердість дорівнює сумі добутків

Обсягів кожної фракції на її твердість (табл. 2.5).

$\Delta m, \text{г} \cdot 10^{-3}$

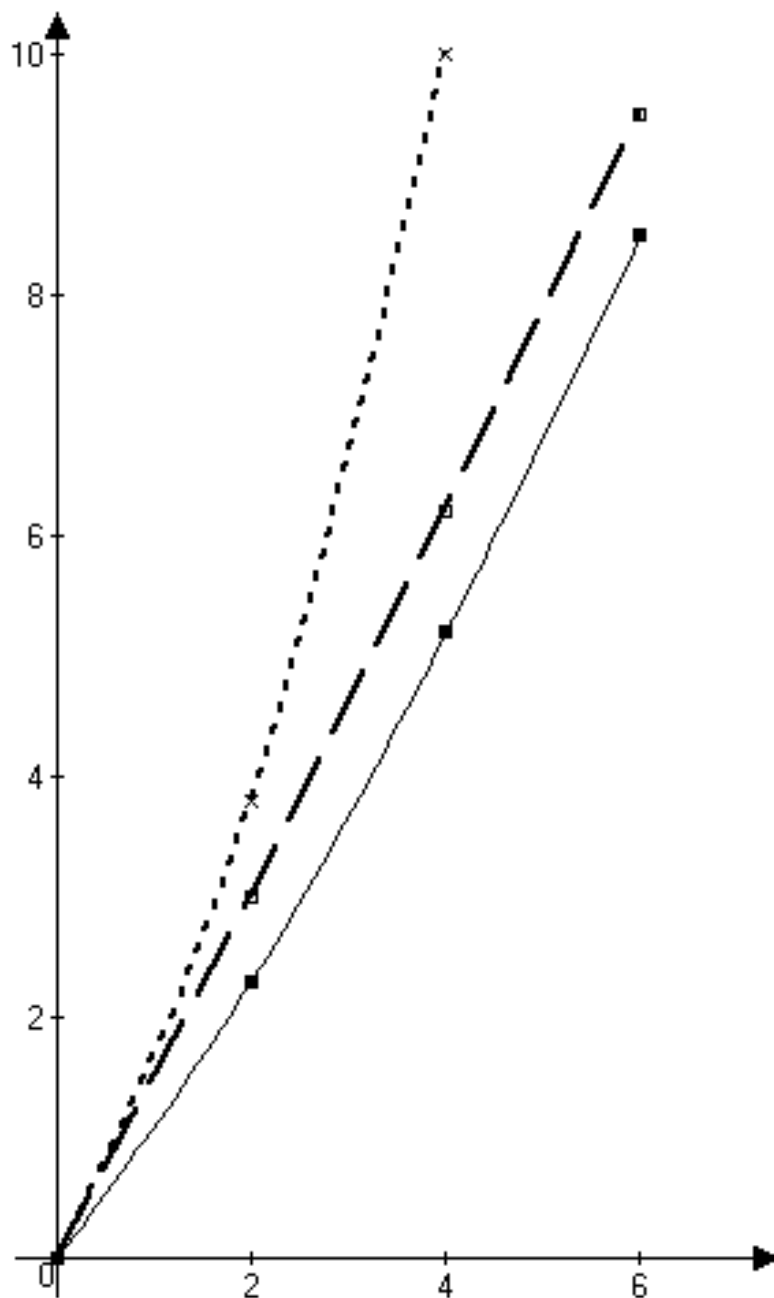


Рисунок 2.13 - Знос багатокомпонентних латуней при абразивному впливі маси частинок піску. 800 об / хв: 1 - склад №1; 2 - склад №3; 3 - склад №2 відповідно до даних табл. 2.1

Таблиця 2.5 - Порівняння значень коефіцієнтів еквівалентної твердості  $K_{T \text{ екв}}$  для ЛКМ

Матеріал №№ обр	Співвідношення структурних складових в ЛКМ		$K_{T \text{ екв}}$ для абразивів*	
	Об'єм гранул, %	Об'єм матриці, %	пісок	Карбід кремнія
ЛКМ	70	30	0,28	0,1
	60	40	0,27	0,1
	50	50	0,26	0,09
ЛКМ	70	30	0,25	0,09
	60	40	0,23	0,087
	50	50	0,22	0,080

\*Твердість абразивів:  $H_{\mu \text{ піска ср.}} = 1203 \text{ кг/мм}^2$ ;  $H_{\mu \text{ SiC ср.}} = 3250 \text{ кг/мм}^2$ .

$K_T = \frac{H_{\mu \text{ мат-ла}}}{H_{\mu \text{ абр}}}$ , где  $H_{\mu \text{ мат-ла}}$  – мікротвердість матеріалу;  $H_{\mu \text{ абр}}$  – мікротвердість абразиву.

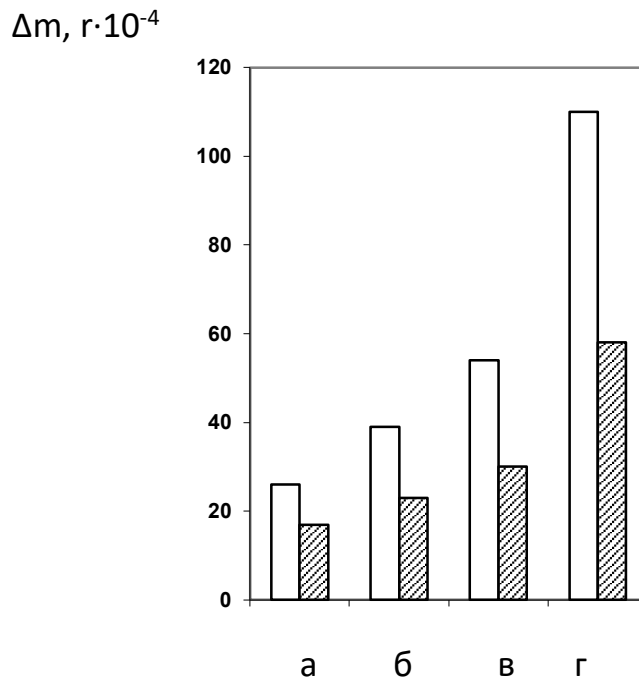
$K_{T \text{ екв}} = \frac{H_{\mu \text{ матр}} \cdot C_m + H_{\mu \text{ гр}} \cdot C_{gr}}{H_{\mu \text{ абр}}}$ , где  $H_{\mu \text{ матр}}$  и  $H_{\mu \text{ гр}}$  відповідно мікротвердість матриці та

гранул ЛКМ;  $C_m$  и  $C_{gr}$  – об'ємний зміст матриці и гранул в ЛКМ.

Порівняння отриманих даних свідчить про те, що значення  $K_{T \text{ екв}}$  для композитів №604, 900 відповідає дійсності та підтверджують висновок про абразивної стійкості матеріалів. Однак можливий варіант, коли  $H_{\mu \text{ матр}}$  буде настільки велике, що матеріал виявиться беззносним для даного абразиву, тобто  $K_{T \text{ екв}} > 0,5-0,6$ . Цей висновок вказує на можливість прогнозування абразивної стійкості ЛКМ на основі порівняння  $H_{\mu \text{ екв}}$  и  $H_{\mu \text{ абр}}$ , регулюючи співвідношення армуючої фази і матриці в ЛКМ.

При дії абразивних частинок піску втрати ваги у ЛКМ №604 на 40-50% нижче, ніж у ЛКМ №900, у всьому діапазоні застосованих швидкостей і часу випробування. На рис. 4.4 як приклад зображені порівняльні дані зносу цих композитів, отримані при випробуванні в ідентичних умовах впливу

абразивного пісочної маси, що корелюється з величиною  $K_{т\text{екв}}$  для цих матеріалів (табл. 2.5). Звідси можна зробити висновок про те, що абразивна стійкість композитів залежить в значній мірі від їх складу, структури і



 - ЛКМ №900;

 - ЛКМ №604

Рисунок 2.14 - Втрати ваги зразками ЛКМ при випробуванні в абразивній масі піску при швидкості 800 об / хв (а, в) і 1400 об / хв (б, г) протягом 2-х годин (а, б) і шести годин (в, г).

властивостей фаз, що в подальшому виявилось при випробуваннях в умовах впливу закріплених абразивів і прошарку абразивних частинок. Порівняння отриманих даних втрат ваги ЛКМ з моносплавами показало, що композити мають знос в піску на 70-80% нижче, ніж бронза або латунь. Принципові значення в дослідженні абразивостойкости матеріалів має форма частинок. Вона проявляється при трибоконтакті, так як впливає на форму утворюється в матеріалі канавки зносу.



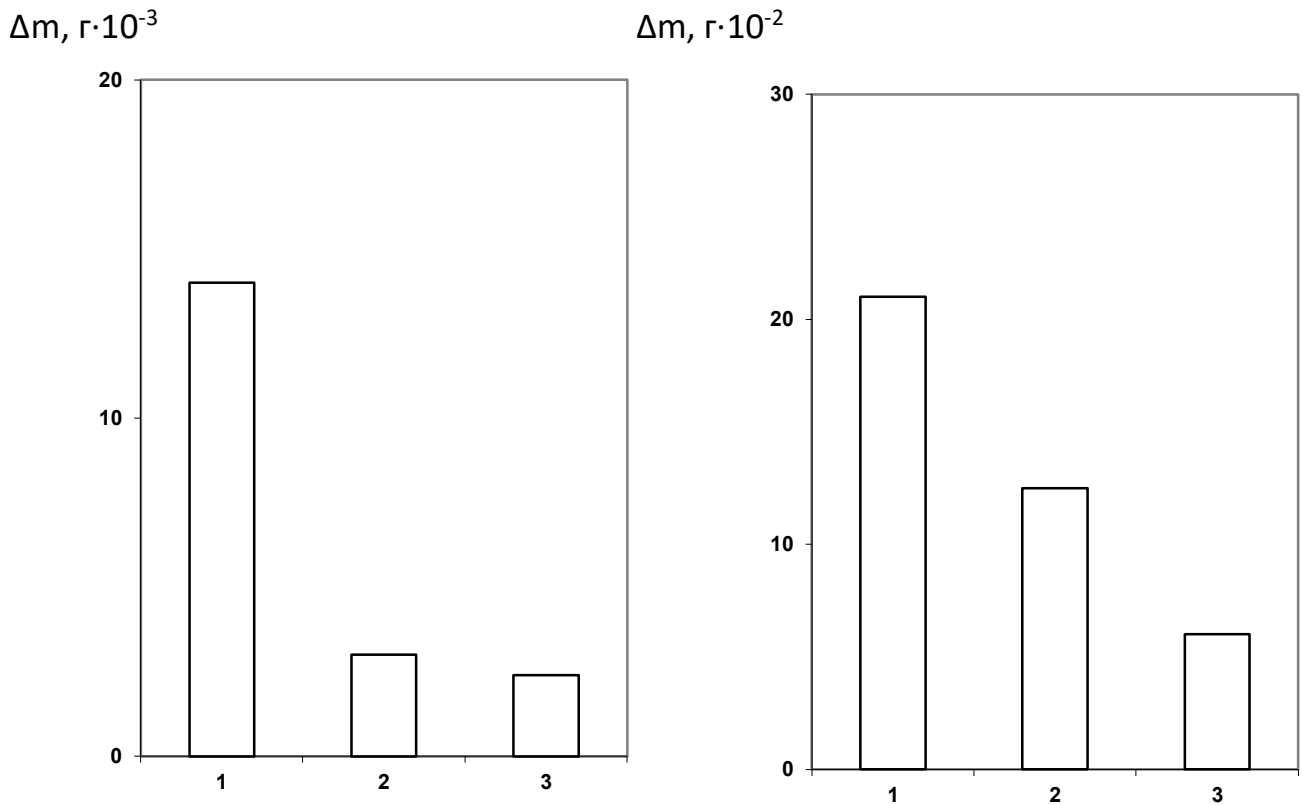


Рисунок 2.15 – Знос зразків при випробуваннях в абразивної маси піску (а) і карбіду кремнію (б) протягом двох годин при  $V = 1400$  об / хв: 1 - бронза; 2 - ЛКМ №900; 3 - ЛКМ №604.

Від радіусу округлення виступу на частці, при її роботі в абразивної маси, залежить виникнення максимальних напружень на контакті з зношується зразком і в результаті характер зносу. Тому було проведено петрографічний аналіз використовуваних при проведенні дослідів абразивних частинок. Встановлено, що пісок складається в основному із зерен ізометричний форми з гострими і закругленими виступами. Поверхня зерен гладка, на деяких злегка шорстка. Частинки чорного карбіду кремнію мають неправильну, подовжено-пластинчасту форму з гострокутними краями. Радіуси заокруглення на частинках відсутні. Поверхня їх раковистим, місцями шорстка. Таким чином, в результаті петрографічного дослідження встановили, що гострокутні частинки піску є досить активним абразивом.

З природою контакту абразиву з зношуються матеріалом зазвичай пов'язують також вплив зернистості, інакше крупності абразивних частинок, на

величину зносу. Відомо [1], що зі зменшенням їх розміру, інтенсивність зношування швидко знижується. Критичною величиною є 100 мкм. Крім того, наприклад, міцність таких частинок з карбіду кремнію в 6 ... 7 разів вище міцності їх при використанні фракції в 1500 мкм [3]. Не менш важливим є ступінь закріпленості в масі діючої абразивної частинки, її рухливість, що забезпечує приплив гострих зерен натомість затуплених. Для стабілізації процесу впливу абразиву, використовують ущільнення абразивної маси вертикальним навантаженням. З огляду на всі перераховані фактори, що впливають на показники абразивної стійкості, випробування проводили при постійному навантаженні і зернистості використовуваних абразивів. Таким чином, можна відзначити, що варіативність одержуваних даних може бути пов'язана тільки з формою і твердістю застосованих абразивних частинок. Так, твердість карбіду кремнію в  $\sim 2,5$  рази більше твердості кварцових піщинок. Частинки карбіду, володіючи остроугольной формою, більшою мірою надають абразивну дію на випробовувані матеріали, ніж ізометричні зерна піску. При впливі абразивної маси частинок карбіду кремнію знос моносплавів і ЛКМ зростає. Як приклад на рис. 2.15 показана різниця в значеннях втрат ваги зразків ЛКМ в порівнянні з бронзою при заміні піску частками SiC. При цьому бронза зношується в 12-15 разів інтенсивніше, а ЛКМ в 6...10 разів.

## 2.5 Вплив умов впливу сипучої абразивної маси на знос випробовуваних матеріалів

Для деталей, що зношуються в абразивній масі однієї з основних характеристик є залежність зносу від величини шляху тертя, яка визначається часом впливу абразивних частинок. В умовах проведених дослідів час випробувань змінювали в межах від 1 до 6 або 8 год. При цьому швидкість переміщення, щодо абразивного середовища, становила 800, 1400 і іноді 2500 оборотів шпинделя зі зразком в хвилину. Шлях тертя при швидкості 800 об / хв становив 3-18 км, при 1400 об / хв - 5-30 км, і 2500 об / хв - 9,5-57км. За

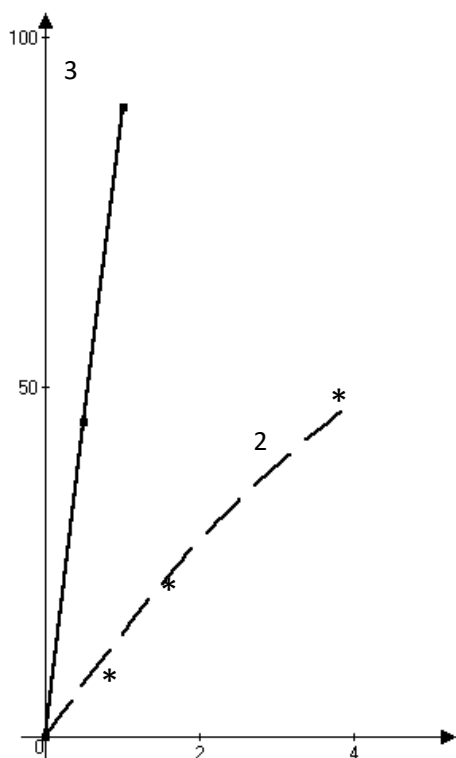
отриманими результатами були побудовані графіки динаміки зношування, що зображують зміну величини зносу від часу впливу абразивної маси частинок. Розгляд їх показало, що є відмінності в характері зношування моносплавів і ЛКМ. Так, наприклад, для алюмінію характерно рівномірне наростання зносу і графік має лінійний характер, як при впливі піску, так і карбиду кремнію (рис. 2.16 а). При збільшенні числа обертів і заміні піску на більш твердий абразив (SiC), спостерігається катастрофічне наростання зносу алюмінієвого зразка, що виражається в різкому збільшенні втрат його ваги вже протягом перших двох годин випробувань. За абсолютним значенням знос у алюмінію менше, ніж, наприклад, у бронзи і латуні. Це можна пояснити наявністю плівки оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ) на поверхні алюмінієвого зразка, яка, маючи, як відомо, високу твердість [5,6], захищає матеріал від зносу.

Латунь і бронза в масі піску мають інший характер зношування (рис. 2.16 б, в). Для цих моносплавів в області 800-1400 об / хв. має місце відхилення від прямої залежності втрата ваги - час випробувань (рис. 2.16 б, в). Криві, представлені на цих графіках відповідають випадкам, коли відсутня приробітка зразка. Період усталеного зношування настає відразу з початку роботи. [7]. Знос наростає з різною швидкістю. При підвищенні швидкості обертання зразків в абразивної маси піску, графіки набувають лінійний характер при рівномірному наростанні величини зносу.

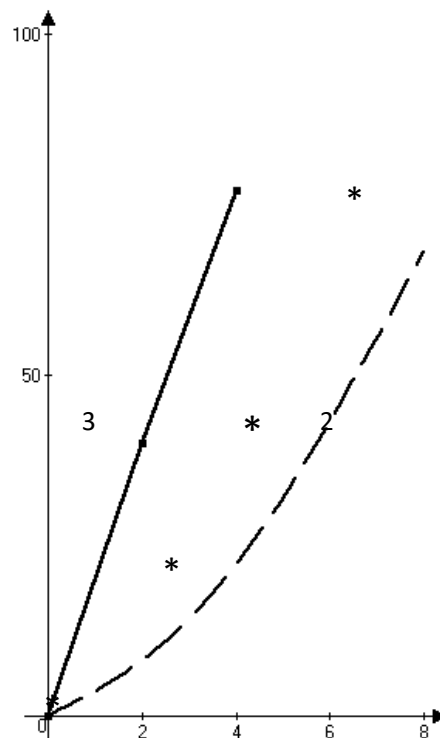
Інакше поведуться при впливі часток піску композиційні матеріали (рис. 2.17). Розгляд поданих кривих дозволяє стверджувати, що вони підпадають під дію законів динаміки зношування II і III типу [4, 7, 8]. При випробуваннях в умовах 800 об / хв на кривій залежності втрат ваги від часу можна виділити 2 характерних ділянки. На першому (протягом перших двох годин) зношування відбувається з відносно великою швидкістю і його можна розглядати як період підробітки (рис. 2.17). Далі слід ділянку кривої з невеликим і приблизно постійним за величиною зносом. Зі збільшенням числа оборотів, втрати ваги зразків зростають. Обидва види ЛКМ демонструють ідентичний характер зношування. Але за абсолютними показниками явну перевагу має ЛКМ №604,

що відрізняється більш високою твердістю гранул і матричного сплаву. Для цього композиту характерним є, підвищена абразивостійкість у всьому діапазоні використовуваних швидкостей обертання в пісочної абразивної маси. У той час як для зразків ЛКМ №900 при 1400 об / хв спостерігається різке збільшення зносу при подовженні шляху тертя (рис. 2.17 б).

Розглядаючи графіки динаміки зношування моносплавов і ЛКМ можна відзначити відмінності в наростанні швидкості зношування цих матеріалів в часі і при різних обертах. для з'ясування цього були проведені відповідні розрахунки швидкості зношування, а отримані дані нанесені на графіки залежності швидкості зносу від часу для бронзи і ЛКМ (рис. 2.18). Отримані криві мають схожість і відмінності. Подоба полягає в тому, що і у бронзи, і у ЛКМ з самого початку роботи відбувається різке збільшення швидкості зношування. Цей період триває близько 1...2 годин. Потім у бронзи при малих обертах (800 об/хв) починається період сталої швидкості зносу, яка через 4 години роботи різко збільшується (рис. 2.16 а). У ЛКМ більш тривалий період сталої швидкості зношування, який триває до кінця проведених дослідів. При підвищенні швидкості обертання зразків у бронзи різко зростає інтенсивність зношування. У ЛКМ стабільно вона не змінюється після підробітки, що характеризує здатність матеріалу до тривалої експлуатації. У той же час з представлених на рис. 4.8 графіків видно, що ЛКМ №900 відрізняється більш високою швидкістю зношування, ніж ЛКМ №604, особливо при великих оборотах обертання зразка. Це ще раз підтверджує положення про те, що зносостійкість композиційного матеріалу визначається його структурою і властивостями фаз: більш тверді гранули і матриця забезпечують підвищену стійкість матеріалу в абразивної маси.

$\Delta m, \text{г} \cdot 10^{-4}$  $\Delta m, \text{г} \cdot 10^{-3}$ 

а  
 $\Delta m, \text{г} \cdot 10^{-3}$



б

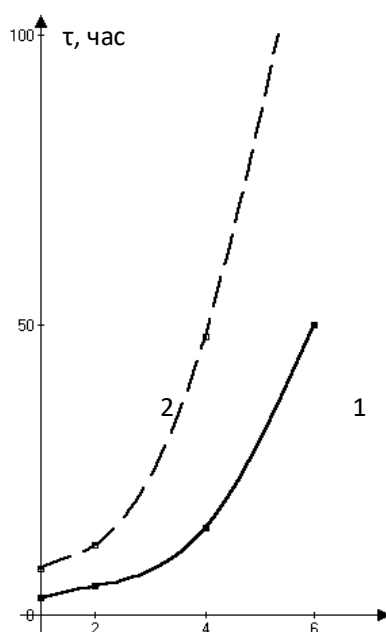
 $\tau, \text{час}$ 

Рисунок 2.16 - Динаміка зношування моносплавів при різних швидкостях переміщення зразків в абразивній масі піску: а - АК12М2МгН; б - латунь; в - БрАЖ9-4. 1 -  $V = 800$  об / хв; 2 -  $V = 1400$  об / хв; 3 -  $V = 2500$  об / хв.

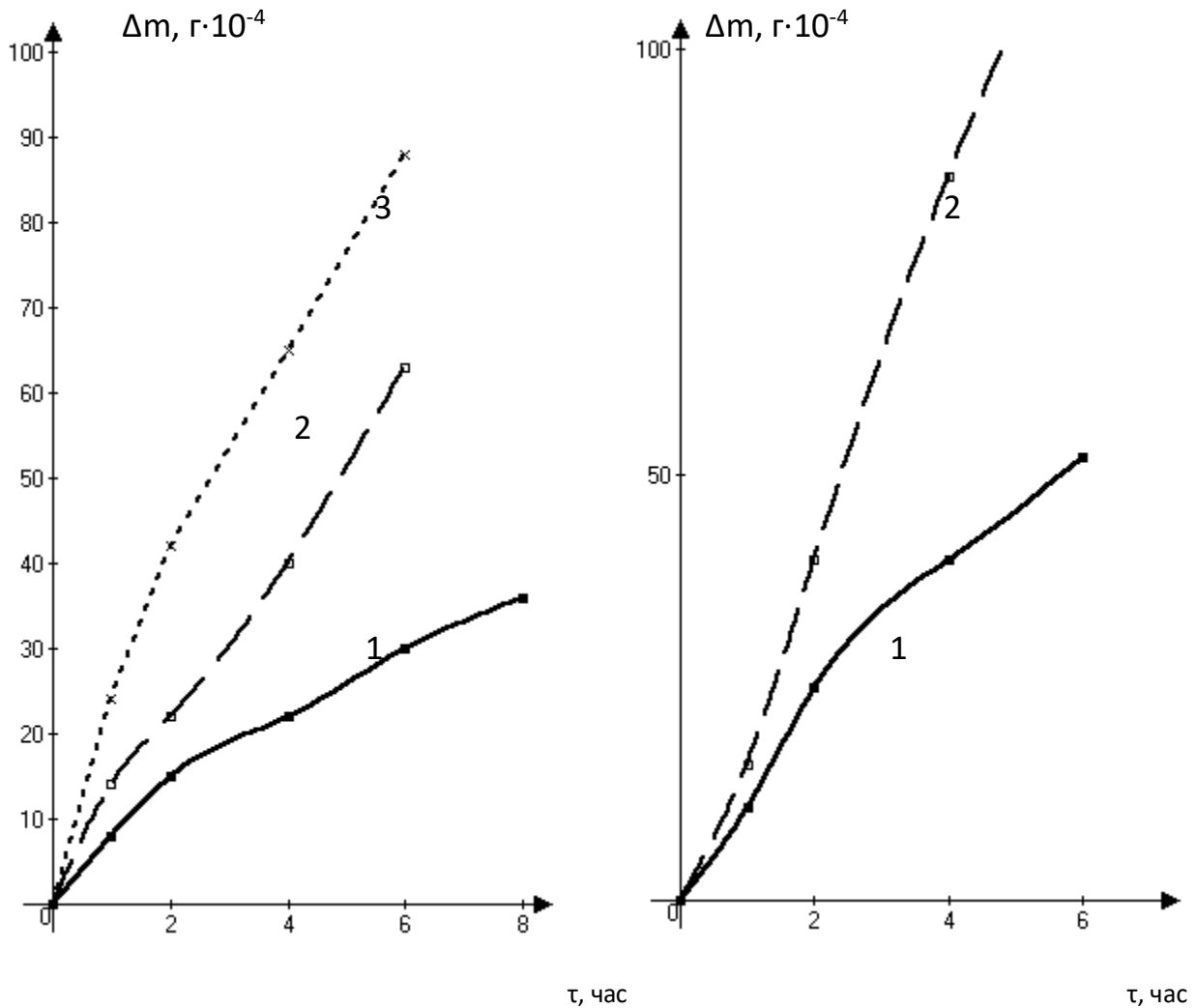


Рисунок 2.17 - Динаміка зношування ЛКМ №604 (а) і №900 (б) при різних швидкостях переміщення зразків в абразивній масі піску: 1 - 800 об / хв; 2 - 1400 об / хв; 3 - 2500 об / хв.

При заміні піску на більш тверді частинки карбиду кремнію змінюється характер зносу ЛКМ і порівнюваного моносплава бронзи (рис. 2.19). Криві зношування за часом для бронзи мають лінійний характер: безперервне наростання втрат ваги зі збільшенням шляху тертя зразків (рис. 2.19 а). У ЛКМ при випробуваннях в умовах 800 об/хв криві, на відміну від дії маси піску, не мають періоду підробітки. Стале зношування настає незабаром після початку роботи. Після чотирьох годин впливу абразивних частинок карбиду кремнію має місце зростання зносу в часі. При збільшенні швидкості переміщення зразка в абразивній масі до 1400 об/хв і зростанні шляху тертя, втрати ваги у ЛКМ

монотонно підвищуються. Але починаючи з 20 км шляху спостерігається різке зниження втрат ваги. Візуальні спостереження показали, що поверхня обертання зразків, що стикається з абразивом, при цьому змінює колір: темніє і набуває блиск. Очевидно, зниження величини зносу в цей період пов'язано з процесами, що відбуваються в поверхневому шарі матеріалу зразків: окислення і полірування. Це призводить до часткової компенсації вагових втрат при збільшенні тривалості впливу абразиву (рис. 2.19 б, в).

При утворенні темного шару на поверхні зіткнення металу з абразивною середовищем зношування стає нестационарним. Такі явища в умовах подібних випробувань спостерігали і інші дослідники [9,10]. При високих швидкостях тертя відбувається значне нагрівання зразків. Внаслідок цього глибина взаємного пластичного впровадження тіл і область пластично-деформованого шару починають зменшуватися. Деформації зосереджуються в тонкому розм'якшеному поверхневому шарі видавлювати мідного сплаву. Цей шар піддається додатковому значного нагрівання, в результаті якого відбувається окислення мідної складової. Поверхня зразка темніє, так як утворюється оксид міді (чорного кольору). Утвориться зона за своїми властивостями починає різко відрізнятися від нижчого металу. Пластичний, рухомий шар знижує питомий тиск в точках контактів і тим самим - глибину впровадження в нижній твердий шар. В результаті цього деформації локалізуються в поверхневому шарі і відбувається вигладжування поверхні. Такий вид руйнування називають полірувальним [9,10]. Механізм його можна розглядати як мікровідшаровування, мікровиривання частинок матричного сплаву і намазування його на більш тверді армуючі сталеві гранули ЛКМ. При цьому швидкість зносу при 1400 об / хв у моносплава бронзи різко знижується через 1 годину роботи, а у ЛКМ через 2 години (рис. 2.20). У ЛКМ №604 з більш твердої матрицею, при значно менших абсолютних показниках втрат ваги і швидкості зносу (рис. 2.19, 2.20).

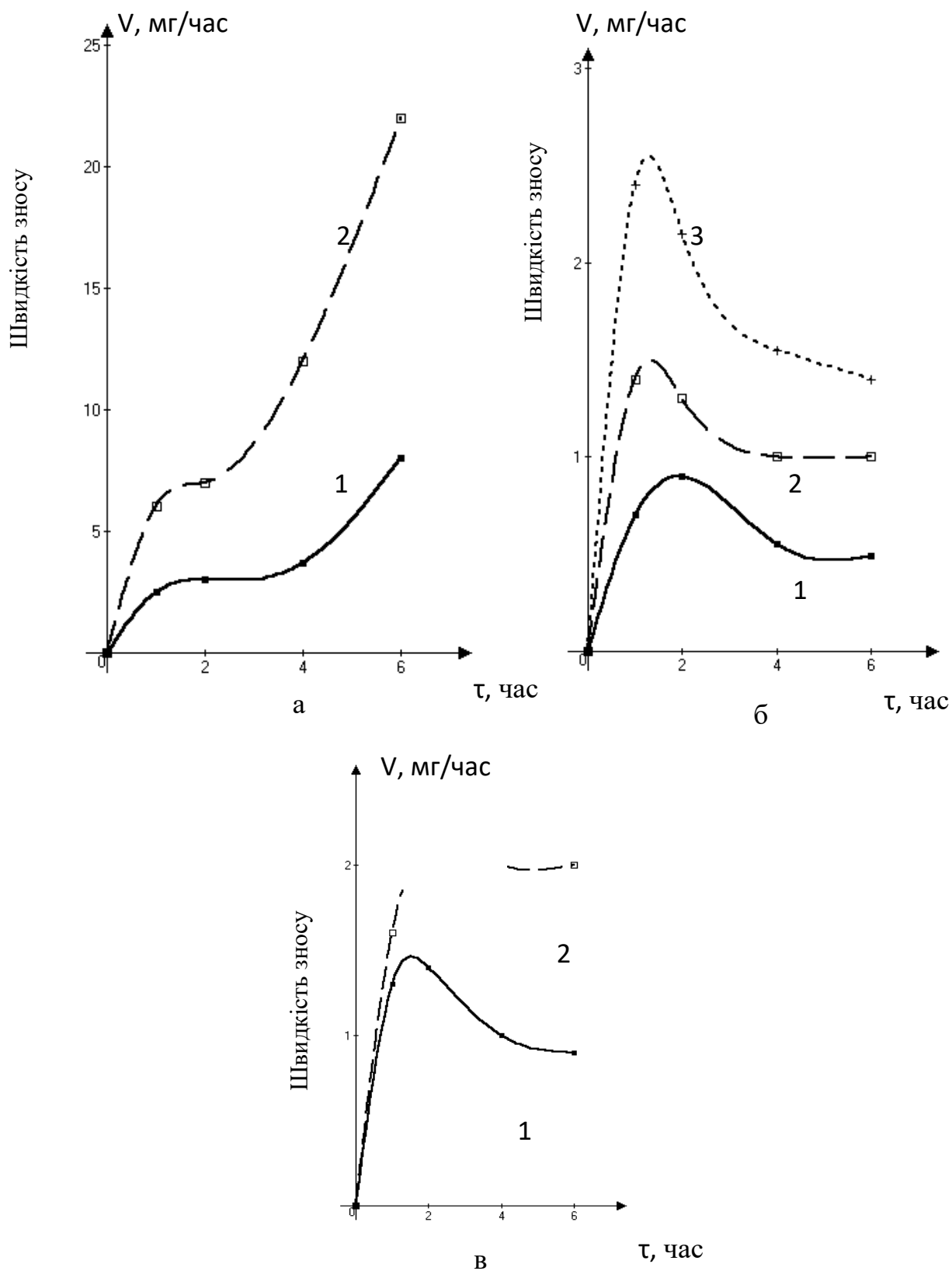


Рисунок 2.18 - Зміна швидкості зносу в часі при випробуваннях моносплава бронзи (а), ЛКМ №604 (б) і ЛКМ №900 (в) в абразивній масі піску: 1 - 800 об/хв; 2 - 1400 об/хв; 3 - 2500 об/хв.



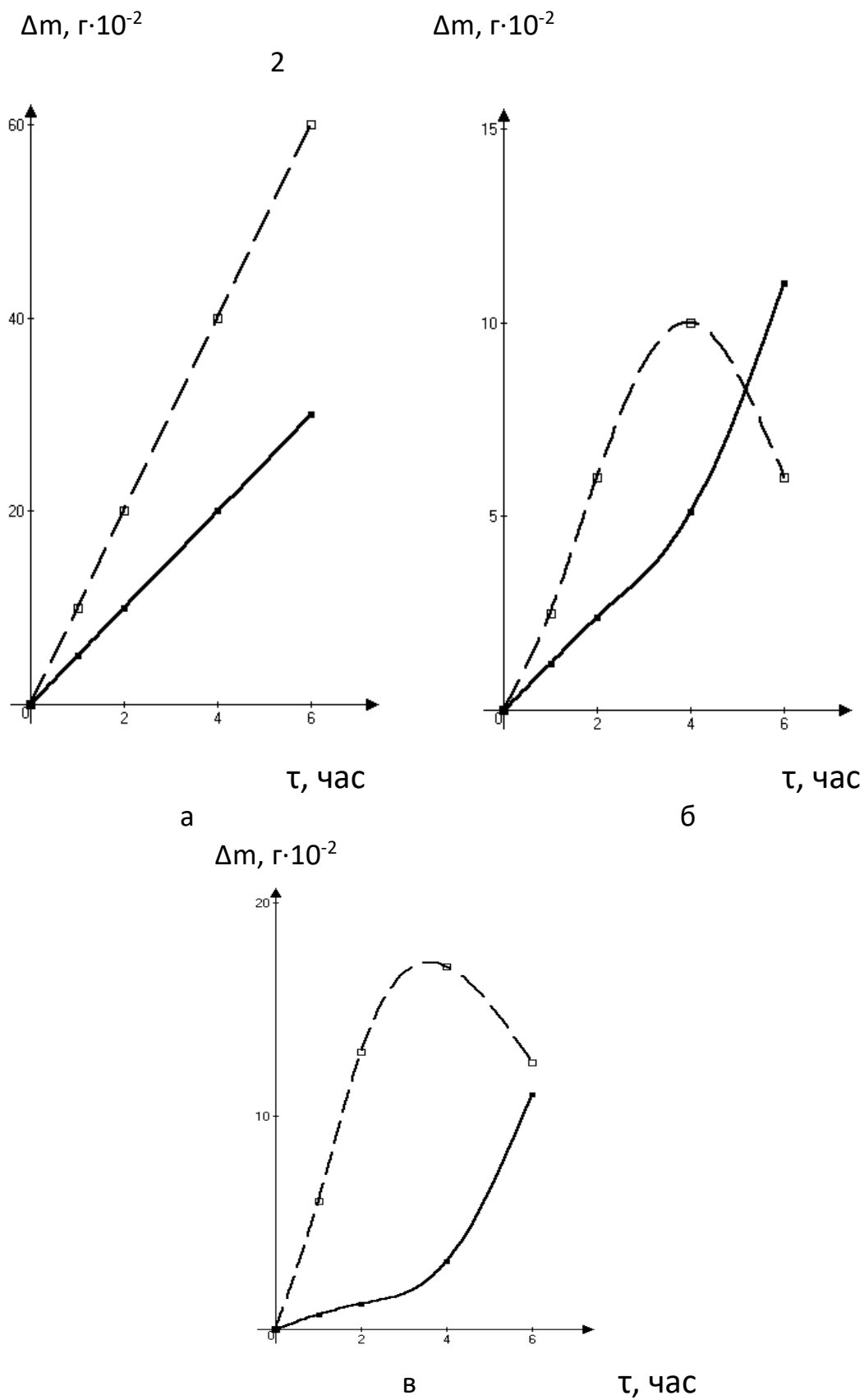


Рисунок 2.19 - Динаміка зношування моносплава бронзи (а), ЛКМ №604 (б) і ЛКМ №900 (в) при різних швидкостях обертання зразків в абразивної маси карбиду кремнію: 1 - 800 об / хв; 2 - 1400 об / хв.

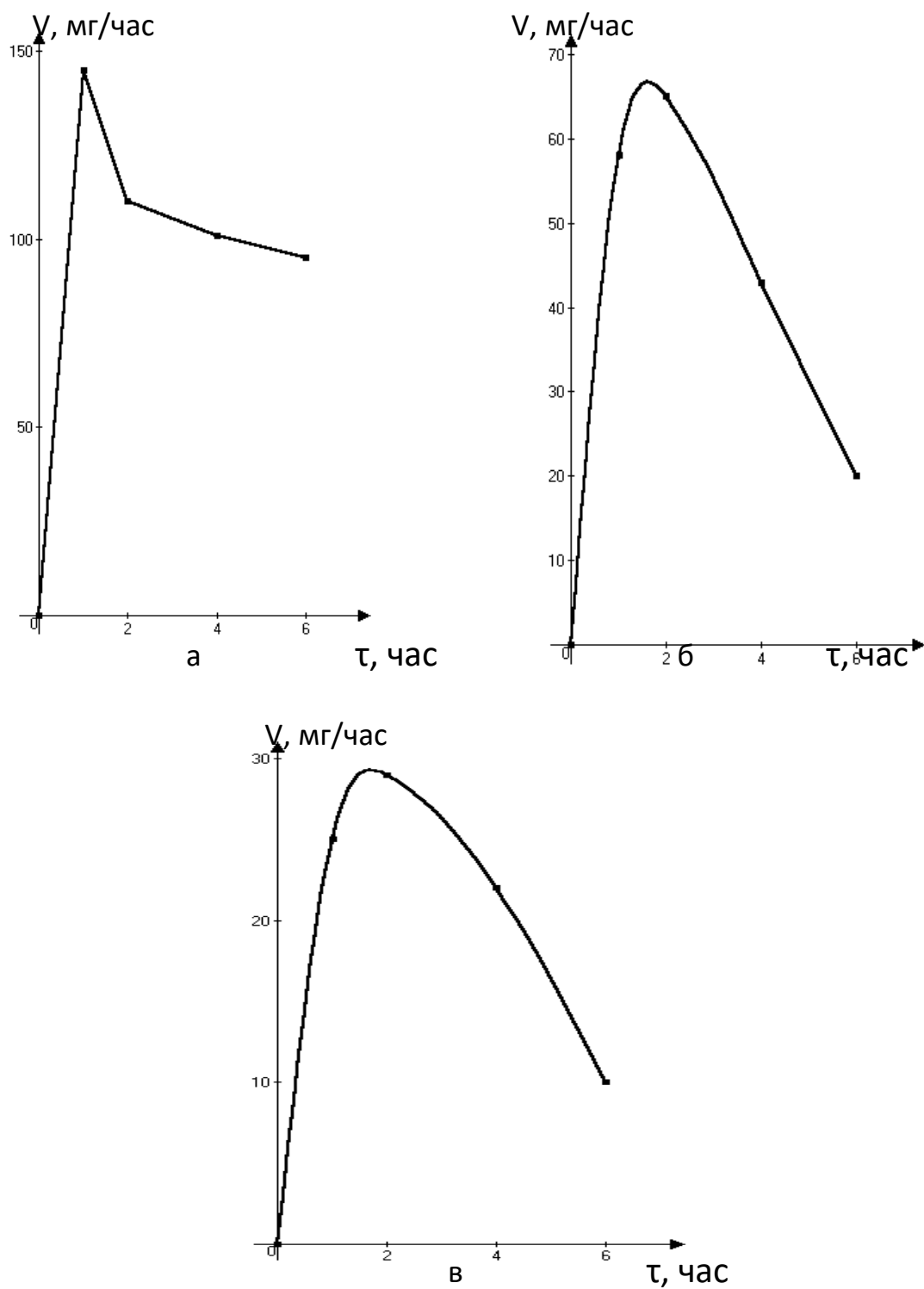


Рисунок 2.20 - Зміна швидкості зносу в часі при випробуваннях зразків бронзи (а), ЛКМ №900 (б) і ЛКМ №604 (в) в абразивної маси карбїду кремнію при швидкості переміщення 1400 об / хв.

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Особливості зношування матеріалів при наявності абразивних частинок в контакті, що труться (про нежорсткозакріплених частинок)

Зношування при терті об абразивну прошарок відбувається тоді, коли між поверхнями двох твердих тіл, що знаходяться у відносному русі, присутні вільні (незакріплені) абразивні частинки ендо- та екзогенного походження, через які від одного тіла до іншого передається навантаження. Природа абразивних частинок різна: пісок, пил, шлак, продукти зносу деталей, коксування масла та ін. Абразивне зношування при наявності частинок в контакті, що труться можливо не тільки в умовах сухого тертя, але і тертя з мастилом. Такий вид зношування відрізняється великою різноманітністю можливих умов: 1) прошарок може складатися з одного або декількох шарів частинок; 2) абразив може мати різну природу і міцність; 3) навантаження, що передаються через абразивні частинки, можуть бути різної величини. Характер відносного руху (трибовзаємодія) твердих тіл, співвідношення їх механічних властивостей, також може бути різним. Таким чином, зношування при терті об абразивну прошарок, стосовно до підшипників ковзання, характеризується більшою складністю в порівнянні з зношуванням про закріплення абразивні частинки і в обсязі сипучого абразивного матеріалу.

#### 3.2 Характеристика випробуваних матеріалів

Відомо, що опір зношування визначає структура матеріалу з її комплексом фізико-механічних характеристик, обумовлених, насамперед, Металознавчі особливості, такі, як хімічний склад, тип структури, її фазова складова, реакція на температурний і деформаційний вплив, схильність до утворення тріщин, втомним явищам, здатність зберігати початкову будову і властивості і змінювати їх під дією роботи тертя. Тому дуже важливим є вивчення впливу структурних

особливостей і властивостей матеріалів, що піддаються впливу частинок, на абразивостійкість деталей.

Відчували різні матеріали: моносплави латуні і бронзи в порівнянні з ЛКМ, виготовлених з використанням цих сплавів в якості матриці. Особливості структури і властивості фаз випробуваних зразків представлені в табл. 3.1 і 3.2.

З розгляду даних табл. 6.1 видно, що при виготовленні композитів на основі бронзи (ЛКМ №720, 900) використовували сталеву дріб однієї фракції. Армуючі гранули цих ЛКМ мають ідентичну перлітну структуру (рис. 3.1) і близькі значення твердості. Матриця ж відрізняється складом (табл. 3.3), що позначається на її структурі (рис. 3.2) і властивості, а згодом було встановлено, і на показниках абразивостійкості.

ЛКМ на основі латуні містять гранули меншого розміру (табл. 3.1) і вони відрізняються більш низькою твердістю. У той же час матриця, основою якої є  $\beta$ -фаза в латуні при утриманні її в сплаві 70-80% є більш твердої, ніж  $\alpha$ -твердий розчин матричного сплаву композитів №720 і 900.

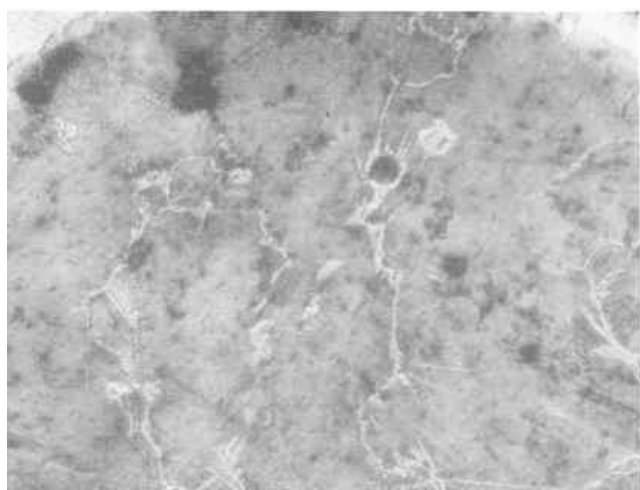
Таблиця 3.1 - Дані металографічного дослідження армуючих гранул ЛКМ, випробуваних зразків

Матеріал № зразк.	Діаметр гранул, мм	Структура	H <sub>ц</sub> , кг/мм <sup>2</sup>			
			перліт	ферит	сорбіт	мартенсит
ЛКМ №601	0,35-1,3	Перлітно-феритна з різним процентним вмістом фериту і перліту	ср. 295 (286...322)	ср. 241 (223...269)	-	-
ЛКМ №720	0,8-1,0	Перліт	ср. 380 (342...449)	-	-	-
ЛКМ №900	0,8-1,2	Перліт	ср. 348 (286...412)	-	-	-
ЛКМ після закалки	0,8-1,2	Голчатий мартенсит	-	-	-	ср. 949-1037 (824...1290)
ЛКМ після закалки і відпуску	0,8-1,2	Сорбіт відпуску	-	-	-	ср. 253-268 (245...286)

Таблиця 3.2 – Хімічний склад матриці ЛКМ випробуваних зразків

Матеріал, № обр.	Вміст компонентів, мас. %									
	Si	Al	Fe	Mn	Ni	Cr	Cu	Zn	Sn	Pb
ЛКМ №720 Матричний сплав	0,06	4,37	5,02	0,37	-	-	90,25	-	-	-
ЛКМ №900 Матричний сплав	0,43	2,6	3,12	0,57	0,4	0,13	83,75	4,67	1,35	2,98

В результаті ЛКМ на основі латуні (рис. 3.3) має значення коефіцієнта еквівалентної твердості наближаються до  $K_{т.екв.}$  ЛКМ на основі бронзового сплаву (табл. 3.4), що забезпечує цим матеріалам близькі значення абразивостійкості, як в піску, так і в карбіді кремнію (табл. 3.4). Еквівалентну твердість гетерогенного композиту визначали, виходячи з принципу адитивності вкладу фаз.

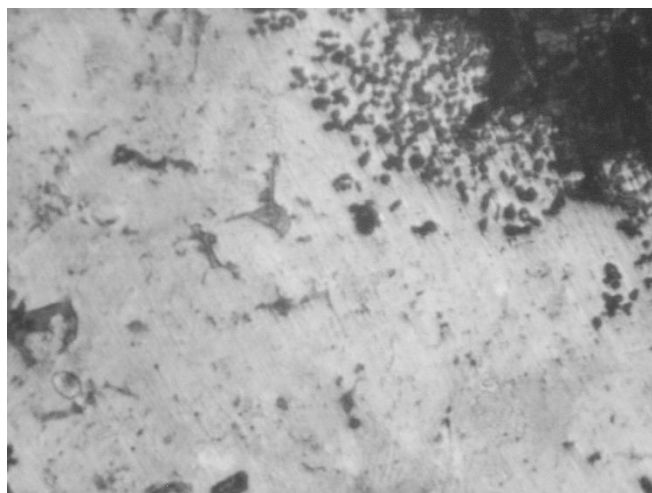


а                      x250



б                      x500

Рисунок 3.1 – Ферито-перлітна (а) та перлітна (б) структура армуючих гранул ЛКМ.



а

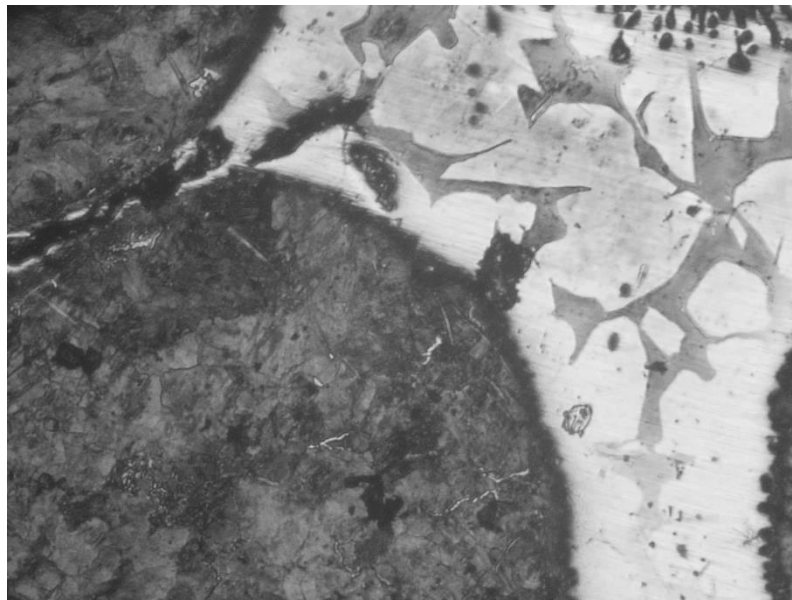


б

Рисунок 3.2 – Структура матриці ЛКМ №720 (а) та №900 (б), x250.



а



б

Рисунок 3.3 – Структура латуні (а) і ЛКМ на основі латуні (б), х100.

Таблиця 3.4 - Значення коефіцієнта еквівалентної твердості ( $K_{т.екв.}$ ) для матеріалів випробуваних в умовах впливу нежорсткозакріплених абразивних частинок

Матеріал, № обр.	Абразив		
	Пісок	Карбід кремнію	Карбід бора
Бронза АЖ 9-4	0,14	0,05	0,03
Латунь ЛС 59-1	0,19	0,07	0,046
ЛКМ № 601	0,2	0,077	0,05
ЛКМ № 720	0,25	0,09	-
ЛКМ № 900	0,25	0,09	-
ЛКМ після гартування	0,6	0,22	-

### 3.3 Залежність абразивного зношування від властивостей випробуваних матеріалів і природи абразивних частинок

Деякі залежності абразивного зношування, справедливі для структурно однорідних матеріалів, є справедливими і для структурно неоднорідних, таких, як литі композити. До них відноситься вплив на величину зносу твердості і форми абразивних частинок. Були проведені порівняльні випробування моносплавов (бронзи, латуні) і ЛКМ на основі цих же сплавів в ідентичних умовах впливу абразивного прошарку (методика випробувань наведена в розділі 3). Використовували дискретні абразиви різної твердості: пісок, карбід кремнію і карбід бору [1, 2]. Частинки піску і карбіду кремнію мали таку ж конфігурацію і особливості форми, як і при випробуваннях в обсязі сипучого матеріалу. Розмір їх складав в основному 80-160 мкм. Частинки карбіду бору мали ізометричні форму у вигляді трикутників, багатокутників, квадратів, паралелепіпедів з гострокутними краями. Радіуси заокруглення на частинках були відсутні. Використовувана фракція мала переважно розмір 20-30 мкм. Так як твердість карбіду бору в 1,5 рази вище твердості карбіду кремнію і в 4 рази - піску, можливо було припустити, що частинки  $B_4C$ , маючи при цьому гострокутні краю, і при даній зернистості надаватимуть більш інтенсивне абразивну дію, особливо в умовах їх присутності на контакті, що труться.



На рис. 3.4. представлені порівняльні показники абразивного зношування мономатеріалів і ЛКМ. На рис. 3.4 - I - латунь (марки ЛС 59-1), ЛКМ на основі латуні того ж складу і для порівняння знос стали 45. На рис. 3.4. - II - бронза і ЛКМ на матриці цього ж сплаву. Як видно з наведених результатів, втрата ваги зразків у всіх випадках впливу абразивних порошків у композиційного матеріалу менше, ніж у мономатеріалів: латуні, бронзи і сталі. При дії кварцового піску вона в 3,4 рази нижче, ніж латуні: в 2,3 рази - ніж сталі і 2,8 рази, ніж бронзи. При впливі карбіду кремнію - відповідно в 4,0; 2,6 і 1,7 рази; в присутності частинок карбіду бору - в 7,0; 2,6 і 1,5 рази. Моносплави на основі міді, як відносно однорідні матеріали, що мають невисоку твердість і ін. Показники, є менш Абразивостійкий, ніж композити. ЛКМ, як структурно неоднорідні, містять більш тверді макрофази (сталеві гранули), що розташовуються в в'язкої пластичної матриці мідних сплавів аналогічного складу, демонструють більш високу стійкість у присутності всіх трьох видів абразивних частинок. При порівнянні значень коефіцієнтів твердості цих матеріалів (табл. 3.4), видно, що ЛКМ мають більш високі показники, ніж моносплави, які були використані в якості матриці при їх виготовленні. Наприклад, латунь ЛС 59-1 (Кт.екв. = 0,19-0,46) і ЛКМ на основі цієї латуні (Кт.екв. = 0,2-0,6), або бронза (Кт.екв. = 0,14-0,03) і композити на цьому матричному металі (табл. 6.4).

В ряду  $\text{SiO}_2$  -  $\text{SiC}$  -  $\text{B}_4\text{C}$  втрати ваги зростають відповідно підвищенню твердості використовуваних абразивів. Встановлено, що структура і еквівалентна твердість випробовуваних матеріалів також грає істотну роль. Присутність армуючих сталевих гранул в матриці мідних сплавів сприяє підвищенню абразивостойкості матеріалів. При цьому, чим вище твердість матриці і гранул, тим нижче показники втрат ваги зразків. У разі ЛКМ на латунної матриці ці втрати відносно нижчою, ніж у композитів на основі бронзи. Це можна пояснити тим, що використовувана в якості матриці бронза має меншу твердість, ніж двухфазная латунь. Відповідно і матриця одержуваних на основі цих сплавів композитів також має подібні якості (табл. 3.2). В результаті при заміні м'якого піску на більш тверді карбіди, знос ЛКМ на основі бронзи - в 5-8

разів (рис. 3.4). Як буде показано далі, не менш важливе значення має і твердість сталевих гранул.

$\Delta m$ , г

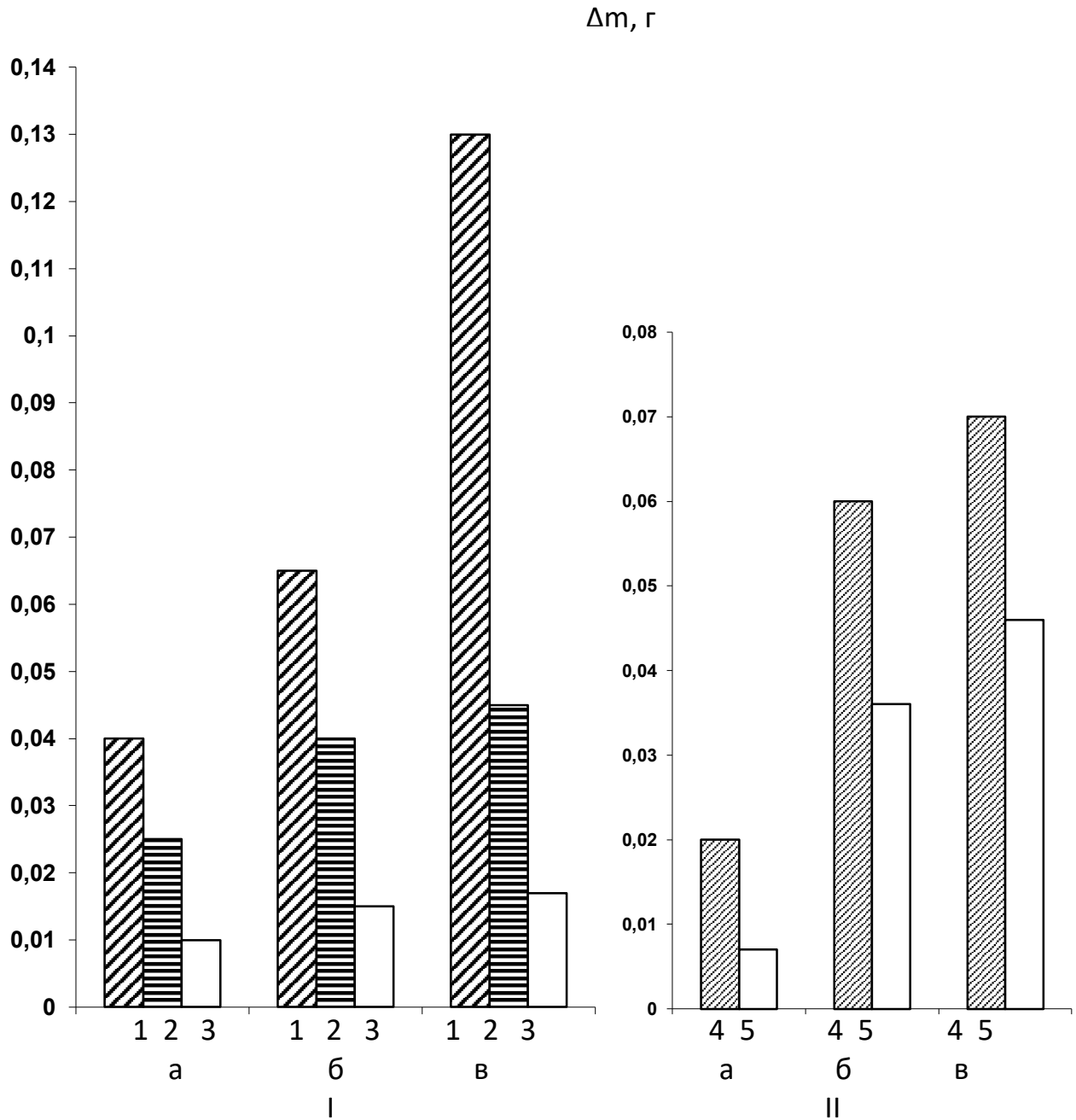


Рисунок 3.4 - Втрати маси зразків при абразивному зношуванні в умовах дії нежесткозакреплених частинок піску (а), карбіду кремнію (б), карбіду бору (в): 1 - латунь; 2 - сталь 45; 3 - ЛКМ на основі латуні; 4 - бронза; 5 - ЛКМ на основі бронзи.

### 3.4 Вплив умов впливу абразивного прошарку на знос випробуваних матеріалів

Встановлено, що величина абразивного зносу залежить від змін режимів тертя ковзання. Були проведені дослід, в яких визначали залежність зносу від довжини шляху тертя при постійному навантаженні і взаємозв'язок втрат ваги з величиною навантаження при одному і тому ж шляху тертя. У цих експериментах як абразиви використовували пісок і карбід кремнію. Відчували зразки ЛКМ, що відрізняються складом матричного сплаву, об'єктом порівняння служила бронза.

На рис. 6.5. представлені криві, що характеризують знос в залежності від шляху тертя для двох складів ЛКМ і бронзи. У міру підвищення часу воздей наслідком прошарку піску на поверхню випробовуваних матеріалів та відповідно збільшення шляху тертя абразивних частинок, при постійному навантаженні, знос зростає. У бронзі більш інтенсивно, ніж в ЛКМ: в 1,4-2,0 рази за шлях тертя 200 м і в 2,2-2,8 - за тривалість впливу на шляху 600 м.

Розгляд отриманих кривих показує, що є відмінності в характері зношування бронзового моносплаву і ЛКМ. Так, для бронзи притаманне рівномірне наростання зносу при збільшенні шляху тертя, а графік має лінійний характер. Це свідчить про сталість швидкості зношування бронзового сплаву, яка не змінюється в часі. Інший вид мають графіки залежності втрат ваги ЛКМ від шляху тертя. На цих кривих можна виділити 2 ділянки. Перший протягом 100-200 м, коли зношування відбувається з відносно більшою швидкістю, в порівнянні з рештою протяжністю шляху. Його можна розглядати як період підробітки. В подальшому має місце стаціонарний період з поступово спадної швидкістю зношування.

З розгляду рис. 3.5 видно, що величина зносу випробуваних ЛКМ різна. Як було встановлено методом мікрорентгеноспектрального аналізу, гранули в цих композитах мають близький склад і структуру. Склад же матричного сплаву відрізняється (табл. 6.3), що забезпечує йому різну твердість і відповідно характер зносу композитів. У ЛКМ №720, матриця менш тверда, ніж матричний сплав ЛКМ №900. Величина зносу цього композиційного матеріалу в ідентичних умовах випробувань зразків, вище на 20-30%. Це дозволяє припускати, що при близьких значеннях твердості армуючих елементів в ЛКМ, твердість матричного сплаву набуває вирішальне значення при встановленні абразивостійкості композитів.

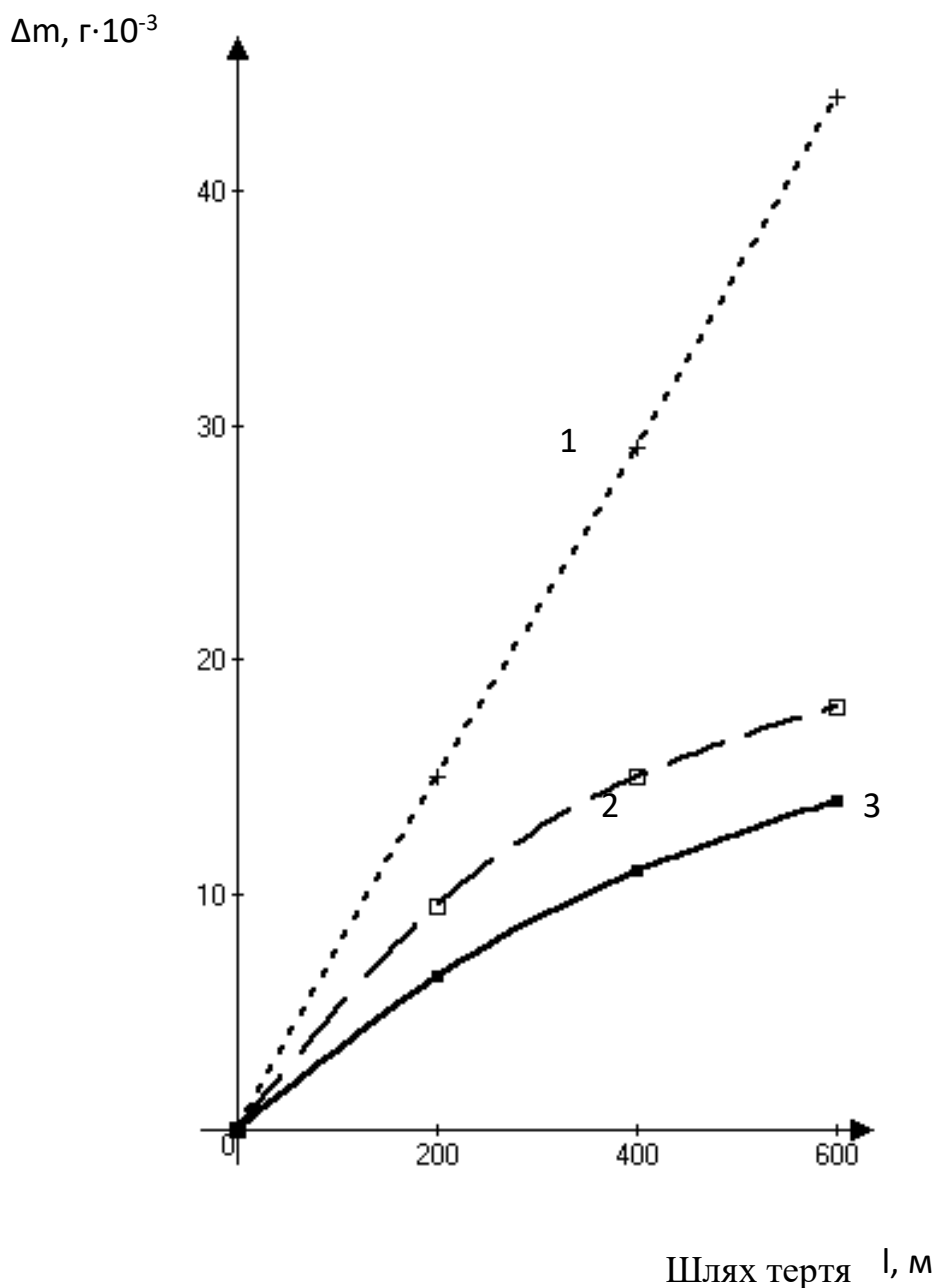


Рисунок 3.5 - Порівняльні показники зносу моносплава бронзи і ЛКМ при зміні шляху тертя ( $l$ ) в умовах впливу прошарку піску і постійного навантаження 4,5 кг: 1 - бронза; 2, 3 - ЛКМ (склади №720 і №900) відповідно.

Вивчення впливу величини навантаження на знос показало зниження абразивостойкості матеріалів при зростанні тиску, що додається (рис. 3.6). У бронзи більшою мірою, ніж у ЛКМ. З композитів у ЛКМ №720 втрати ваги більше, ніж у №900. Наприклад, в умовах прошарку піску, при збільшенні навантаження в 2 рази, знос бронзи підвищується в 3,4 рази, а ЛКМ - в 1,5-1,7 рази. Коли навантаження зростає в 3 рази, знос, відповідно, в 6 і 2,5-2,6 рази.

Так як застосовані при експериментах абразивні частинки піску і карбїду кремнію мали близьку величину зерна, то порівняльне дію на матеріали можливо пов'язувати тільки з їх формою і твердістю. Частинки карбїду, маючи гострокутну форму і в 2,5 рази більшу твердість, стирається поверхню зразків перебуваючи в прошарку в більшій мірі, ніж пісок. Знос матеріалів зростає, особливо при збільшенні шляху тертя. Як приклад на рис. 3.6 представлені порівняльні показники зношування ЛКМ і бронзи при терті в прошарку піску і карбїду кремнію. З розгляду цього малюнка видно, що навіть при збільшенні шляху тертя, знос ЛКМ менше, ніж у бронзи.

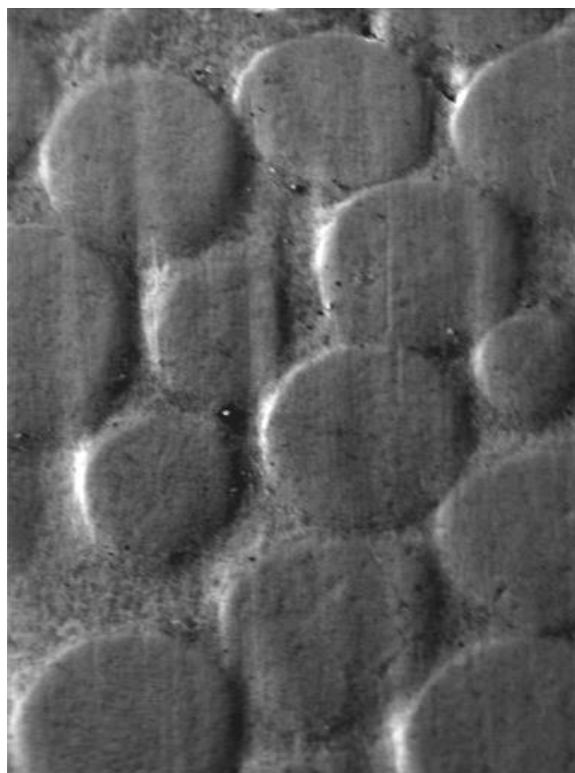
Абразивні зерна, захоплювані обертовим диском, протягуються між ним і плоскою поверхнею зразка. В результаті на цій поверхні утворюється сферичний кратер або за визначенням ряду авторів [3] лунка зношування. Порівняння величини зносу випробуваних матеріалів можна провести за даними глибини утвореної лунки. Показники глибини визначали оптичним методом за допомогою мікроскопа МІН-9. Отримані дані зокрема для ЛКМ №900 та бронзи представлені в табл. 3.5. Розгляд їх показує, що при дії абразивних частинок у ЛКМ глибина лунок зношування менше, ніж у бронзи. При цьому прошарок частинок карбїду більш інтенсивно зношує, ніж присутність піску. Якщо глибина лунок в піску на шляху 200 - 600 м у ЛКМ в 1,5-2,5 рази менше, ніж у бронзи, то в присутності частинок SiC вона змінюється всього в 1,1-1,4 рази. Це дозволяє припускати, що підвищення твердості оброблюваних поверхню ЛКМ частинок впливає і на знос не тільки мідного сплаву, а й сталевих армуючих елементів.

Для пояснення отриманих результатів було проведено металографічні дослідження морфології поверхні тертя випробуваних зразків. Результатом впливу абразивних частинок на поверхню бронзи є формування згладженого мікрорельєфу в лунці зносу. Виникаючі численні ризики і подряпини нівелюються пластичним деформуванням тонких поверхневих шарів матеріалу при терті ковзання. При заміні піску на карбід кремнію на тлі згладженого рельєфу в лунці зносу з'являються глибокі подряпини і борозни пластичного деформування сплаву.

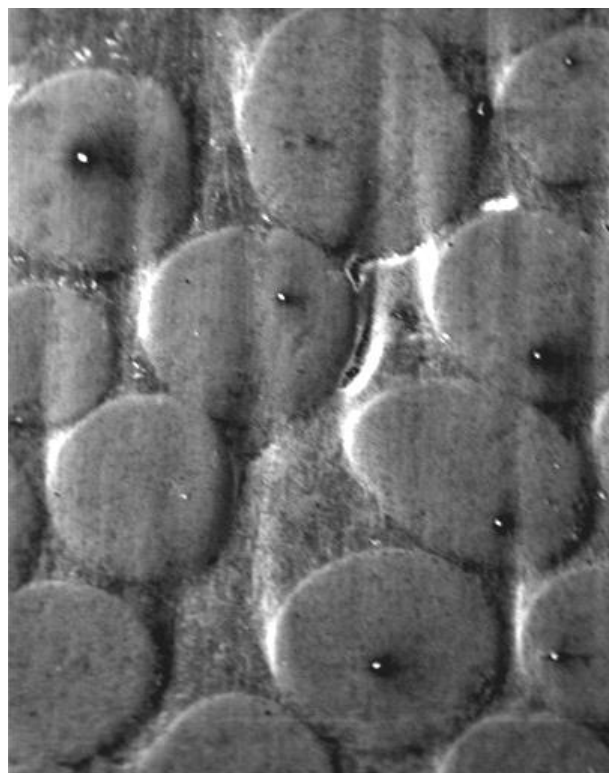
Таблиця 3.5 - Дані про глибину лунок зношування випробуваних матеріалів при впливі абразивних частинок в контактi, що труться

Абразив	Параметри впливу		Глибина лунок в матеріалах, мкм	
	Навантаження, кг	Шлях тертя, м	бронза	ЛКМ
Пісок	4,5	200	38,0	19,0
	4,5	400	64,0	26,6
	4,5	600	90,6	56,3
	10	200	129	30,5
	15	200	180	70,7
Карбід кремнію	4,5	200	188	165
	4,5	400	336	230
	4,5	600	540	460

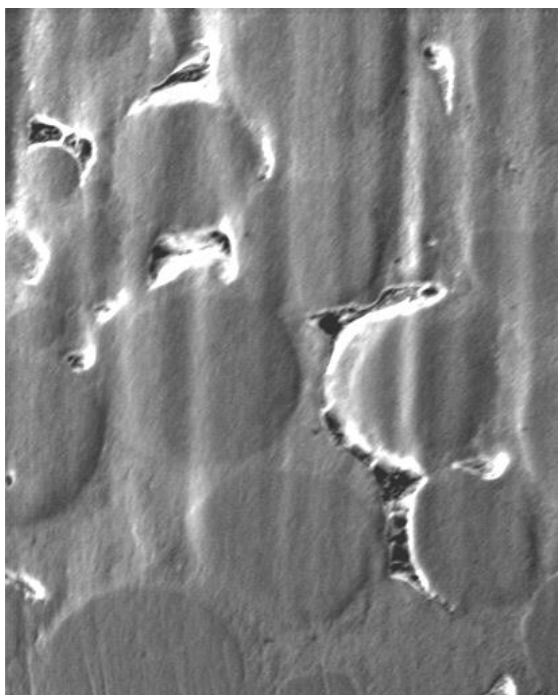
У ЛКМ, при значно відрізняються за твердістю структурних складових, спочатку відбувається зношування більш м'якої основи - матричного сплаву. Тверді сталеві гранули менш схильні до абразивної дії частинок. Так як при даному виді зношування має місце переміщення частинок уздовж поверхні зразка, то на ній з'являються подряпини - риски і групи паралельних ліній - борозен, орієнтованих у напрямку руху абразивів. При розгляді поверхні лунок стирання під мікроскопом видно, що гранули виступають над матрицею. Маючи більш високу твердість вони стираються менше, ніж м'яка матриця. Особливо чітко це проявляється при порівнянні характеру зносу ЛКМ від впливу піску і карбіду кремнію. При розгляді лунок зносу після випробувань ЛКМ по прошарку піску видно, що стирається тільки бронзовий шар, що розташовується між сталевими елементами армуючої фази (рис. 3.8 а). Гранули, що не піддаються абразивному впливу частинок, зберігають форму, розміри і не мають на поверхні слідів зношування. При збільшенні тривалості випробувань (шляху тертя в 3 рази), матричний сплав «розмазується» по поверхні і частково натирається на гранули (рис. 3.8 б). Видно світлі смуги, протяжні по матричному сплаву.



а



б



в

Рисунок 3.8 - Вид лунок зношування ЛКМ в оптичному мікроскопі після випробувань по прошарку частинок піску (а, б) і карбіду кремнію (в) при навантаженні 4,5 кг і різному шляху тертя: а, в - 200 м; б - 600 м. х40.

При впливі більш твердих частинок карбіду кремнію, в бронзовій матриці з'являються каверни в результаті відшаровування її і викришування (рис. 3.8. В). Таким чином, наявність твердих армуючих компонентів в ЛКМ сприяє підвищенню його абразивостійкості в порівнянні з моносплавом того ж складу.

Було висловлено припущення, що позитивний вплив сталевих гранул буде тим ефективніше, чим вище їх твердість і міцність при оптимальній дисперсності. Одночасне зміцнення і збільшення твердості армуючих елементів з заевтектоїдної сталі повинно відбуватися в результаті термічної обробки ЛКМ. Зразки піддавали загартуванню і загартуванню з подальшим високотемпературним відпуском [4]. Загартування проводили від температури 840-8600С в воду, а відпустку - охолодженням зразків на повітрі від 6000С.

В результаті гарту гранули набувають мартенситну структуру (рис. 3.9. А), характерну для високовуглецевої сталі. У деяких зразках присутній також невелика кількість залишкового аустеніту. Мікротвердість гранул зростає в 2-3 рази (табл. 3.1). Після відпустки в гранулах формується сорбіт відпустки (рис. 3.9. Б), а їх мікротвердість наближається до показників вихідного стану. Залежно від складу використовуваної бронзи як матрицю, її мікроструктура також часто змінюється після термообробки ЛКМ. Загартування зразків повністю виключає появу евтектики [5, 6]. Мікротвердість матричного сплаву дещо знижується. Підвищується його пластичність, що позначається на показниках абразивостійкості. У разі використання зразків після гарту і відпустки, коли твердість гранул невисока, а матриці знижена, втрати при стиранні ЛКМ зростають. Абразивостійкість підвищується, коли гранули мають мартенситну структуру високої твердості (рис. 3.9. А). При впливі частинок різної твердості втрати ваги зразками ЛКМ зростають в ряду  $\text{SiO}_2$  -  $\text{SiC}$  -  $\text{B}_4\text{C}$ . Однак, порівняння отриманих показників в залежності від твердості сталевих армуючих елементів, свідчить про більшу абразивостійкості ЛКМ зі сталевими гранулами мартенситної структури (рис. 3.10). Такі втрати ваги ЛКМ в результаті абразивного зношування в 1,5 рази менше, ніж у зразка з гранулами сорбітної структури, при впливі часток піску, і в 1,2 рази - в разі абразивів у вигляді карбідів.

Підвищена абразивостійкість ЛКМ з гранулами мартенситної структури характерна також для композитів в порівнянні з їх початковим станом, при дії частинок різної твердості (рис. 3.11). Навіть у присутності карбіду бору в контакті, що труться, знос загартованого ЛКМ на 7...8% нижче, ніж матеріалу, що не піддається термообробці.

Дослідження морфології поверхні тертя випробуваних зразків проводили методом електронно-мікроскопічного аналізу. Розгляд отриманих знімків показало, що матричний сплав ЛКМ в початковому стані починає стиратися вже

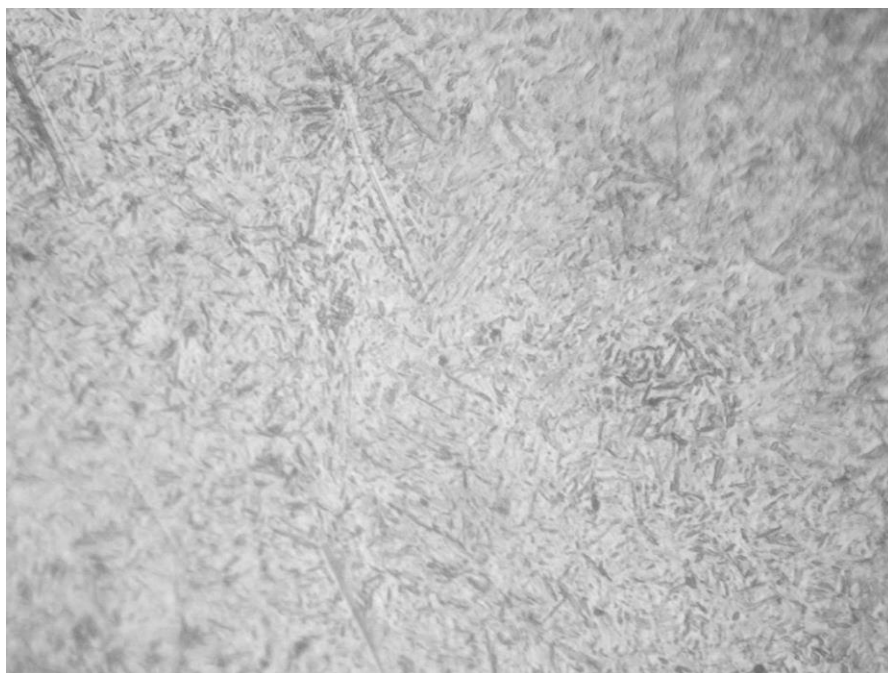


при дії частинок піску (рис. 3.12. а). При використанні карбіду кремнію, матриця натирається на армирующие гранули. Самі гранули, ще мають чіткі обриси, вже як би «згладжуються» (рис. 3.12. б). Вплив ще більш твердого абразиву (В4С) призводить до того, що слідів натирання (наволакивання) бронзового сплаву на гранули стає більше (рис. 3.12. в). В цьому випадку абразивні частки впливають і на сталеві гранули. На них з'являються подряпини і борозни зносу: абразив «обробляє» поверхню всіх елементів структури ЛКМ.

Інакше поводить ся композиційний матеріал після гарту. При розгляді поверхні лунок зношування видно, що сталеві гранули мартенситної структури чинять опір зношування не тільки при дії частинок піску, але і карбіду кремнію (рис. 3.12. г, д). Вони зберігають чіткі межі і як би «виступають» над матрицею. Загартовані гранули практично не піддаються руйнуванню навіть часткам карбіду бору. На їх поверхні тільки з'являються окремі подряпини, хоча матриця вражена кавернами зносу (рис. 3.12 е).

Загартований ЛКМ має менші втрати ваги і в разі збільшення шляху тертя при дії частинок піску і карбіду кремнію (рис. 3.13), а також при підвищенні навантаження. Коли навантаження збільшували в 2...3 рази, то втрати ваги загартованих зразків ЛКМ в порівнянні з вихідним їх станом, зменшувалися на 25...30% (рис. 3.14).

Таким чином, підвищуючи твердість армучих гранул, можна домогтися високої стійкості композиту при абразивному зносі високотверді абразивами, до яких відносять карбіди кремнію і бору.



а



б

Рисунок 3.9 - Структура гранул ЛКМ після гартування (а) і гартування з відпуском (б), х400.

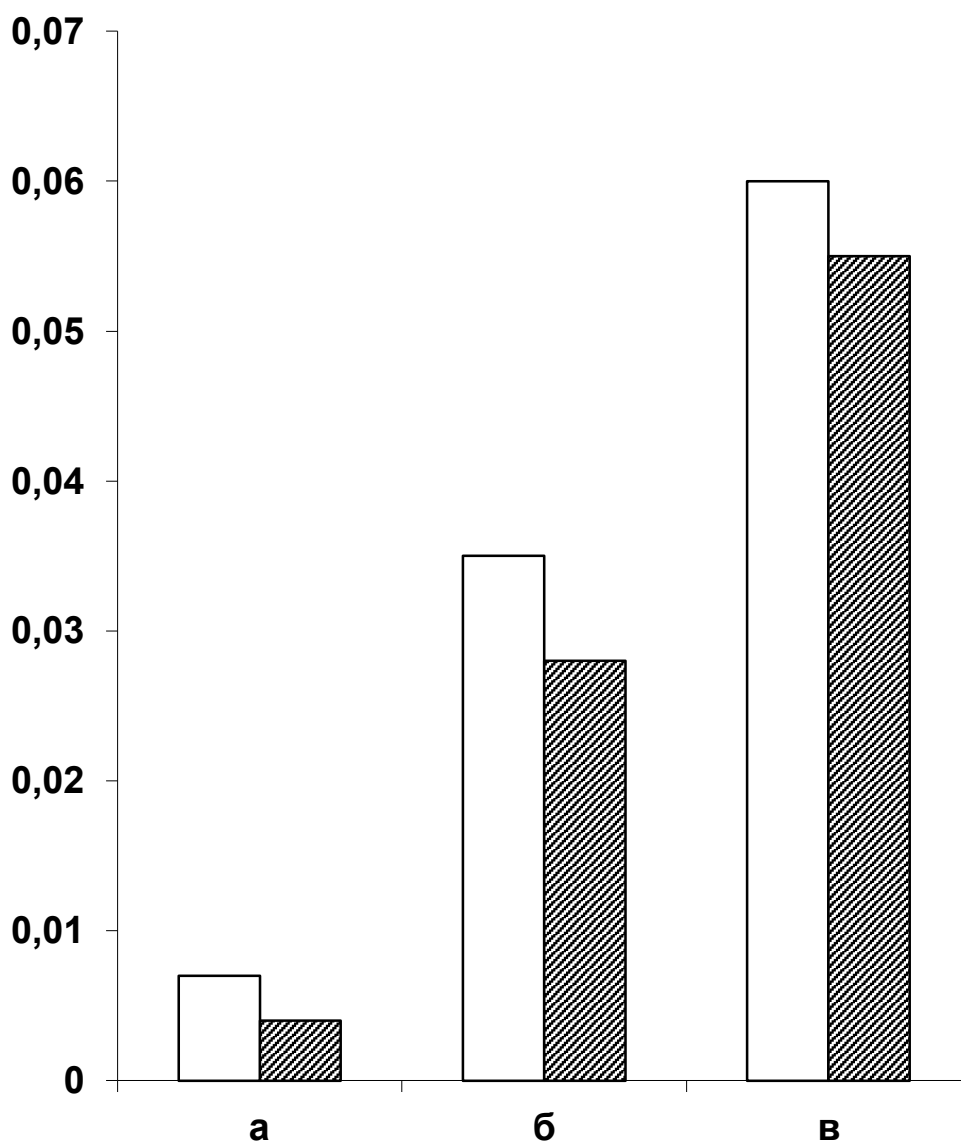




Рисунок 3.10 - Втрати маси ЛКМ ( $\Delta m$ ) при дії різних абразивів: а - SiO<sub>2</sub>; б - SiC; в - B<sub>4</sub>C.

 - ЛКМ після гарту і відпуску;  
 - ЛКМ після гартування.

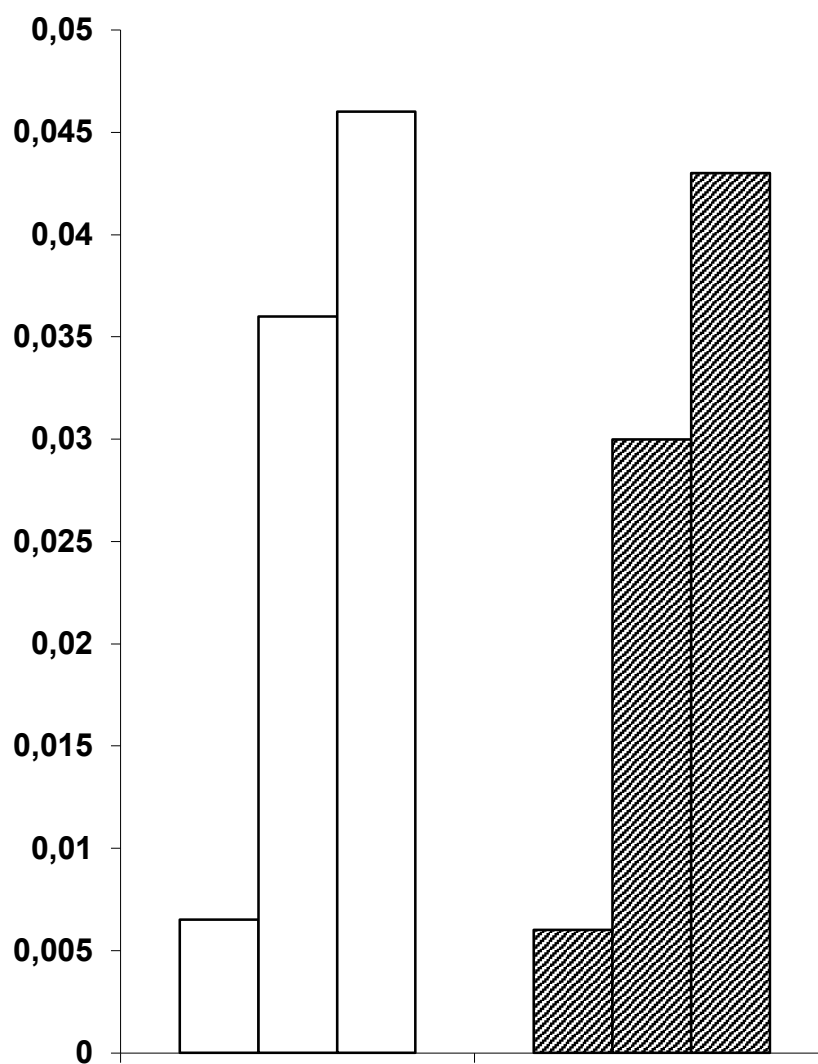
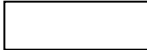

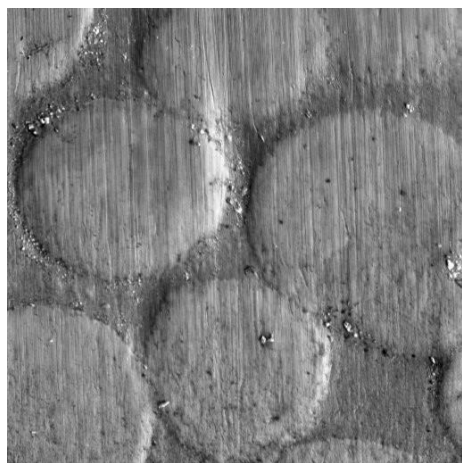
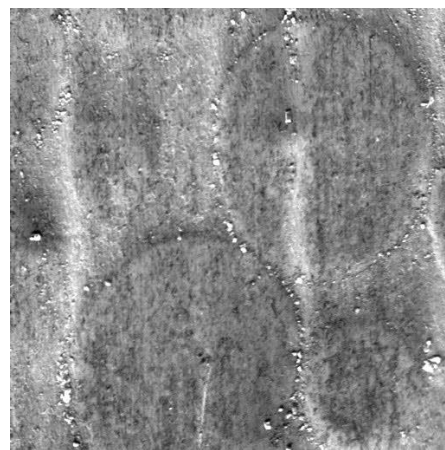


Рисунок 3.11 - Втрати маси зразками при дії частинок різної твердості: 1 -  $\text{SiO}_2$ ; 2 -  $\text{SiC}$ ; 3  $\text{B}_4\text{C}$ .

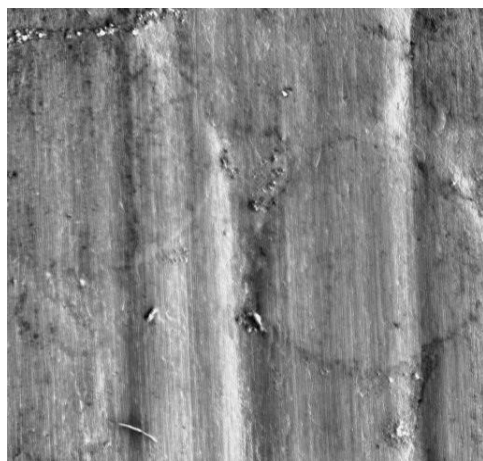
-  - ЛКМ в литому стані;
-  - ЛКМ після гартування.



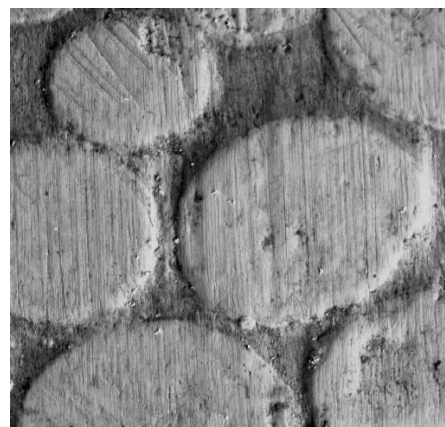
а



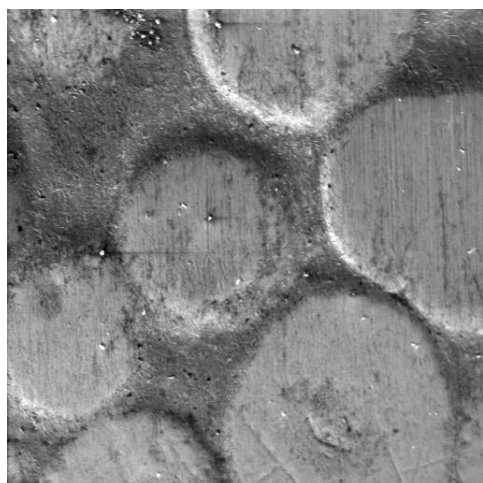
б



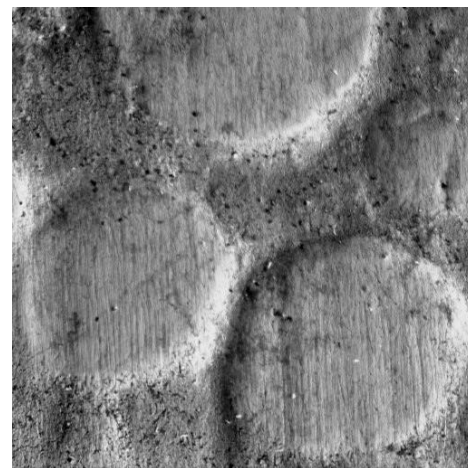
в



г



д



е

Рисунок 3.12 - Растрове зображення поверхні лунок зношування ЛКМ в початковому стані (а, б, в) і після гарту (г, д, е) при дії абразивних частинок в прошарку піску (а, г), карбіду кремнію (б, д) і карбіду бору (в, е), х60.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці – система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини в процесі трудової діяльності [28].

Законодавство про працю містить норми і вимоги з техніки безпеки і виробничої санітарії, норми, що регулюють робочий час і час відпочинку, звільнення та переведення на іншу роботу, норми праці щодо жінок, молоді, гігієнічні норми і правила тощо.

Загальний нагляд за дотриманням норм охорони праці покладено на прокуратуру, спеціальний – на професійні спілки. Контроль за безпекою праці

здійснюють також державні й відомчі спеціалізовані інспекції [28].

Мета даного розділу полягає в аналізі небезпечних та шкідливих чинників, які мають місце при виконанні даної роботи та розроблення засобів, що усуватимуть ці чинники, або нормалізуватимуть їх значення.

### 4.1 Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві

Основний нормативний документ щодо організації охорони праці в Україні – це Закон України «Про охорону праці».

Згідно статті 13, Закону України «Про охорону праці» директор підприємства зобов'язаний забезпечити на робочому місці та у кожному структурному відділенні умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечення нормативно-правових вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці [29].

Відповідно до статті 14 Закону України «Про охорону праці» працівник зобов'язаний дбати про особисту безпеку і здоров'я, оточуючих людей в процесі виконання будь-яких робіт чи під час перебування на території підприємства,

знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів з охорони праці, проходити у встановленому законодавством порядку попередні та періодичні медичні огляди [29].

За статтею 15 Закону України «Про охорону праці» на підприємстві з кількістю працюючих 50 і більше осіб роботодавець створює службу охорони праці відповідно до типового положення, що затверджується центральним органом виконавчої влади, що забезпечує формування державної політики у сфері охорони праці [29].

Основну відповідальність з питань охорони праці несе роботодавець – Наривській А.В. Головою служби охорони праці є Кравчук Н.Д. Основну відповідальність несе Наривській А.А. Всі працівники при прийомі на роботу і в процесі роботи в ФТІМС НАН України проходять інструктаж з охорони праці.

Відповідальним за лабораторію є Затуловський А.С., завідувачем з питань охорони праці – Кравчук Н.Д.

## 5 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 5.1 Науково-технічна актуальність теми досліджень

Науково-технічний прогрес сучасної техніки здійснюється на основі широкого застосування нових наукоємних технологій і матеріалів. Підвищені вимоги до рівня експлуатаційних характеристик матеріалів для екстремальних умов експлуатації більшості деталей, сьогодні і в недалекому майбутньому неможливо реалізувати за рахунок використання серійних сплавів і традиційних методів їх обробки: легування, модифікування, термічної обробки та ін. Оскільки в більшості випадків деталі машин, оснащення, інструменти виходять з ладу внаслідок руйнування контактних поверхонь тертя, розробка нових економноармуючих антифрикційних матеріалів з поліпшеними експлуатаційними характеристиками, для масових галузей промисловості є актуальною і важливою науково-технічною проблемою - особливо для деталей, що працюють в екстремальних умовах сухого або граничного тертя ковзання, підвищених температур, навантажень і швидкостей, абразивного зношування.

З точки зору умов експлуатації такі деталі можна віднести до композиційних із диференційованими властивостями їх локальних частин тому, що при їх експлуатації інтенсивному зношуванню піддається не вся деталь машини, а тільки її частина, яка безпосередньо контактує з абразивом. До хімічного складу, мікроструктури та властивостей матеріалу цієї частини висувають вимоги, направлені на забезпечення заданої твердості та зносостійкості. До матеріалу частини, яка не контактує з абразивом, можуть висуватись інші вимоги, наприклад, забезпечення в'язкості та пластичності.

Як показали дослідження і дослідно-промислові роботи, результати яких узгоджуються з висновками інших авторів, для виготовлення деталей з високими антифрикційними властивостями дуже перспективні литі композиційні матеріали (ЛКМ), порошкові металокомпозити, псевдосплави системи мідь-сталь, залізовуглецеві сплави, що містять включення міді і ін., тому ця тема є актуальною, і економічно вигідною для подальшого її досліджування.



## Витрати на оплату праці.

Таблиця 5.1 – Трудомісткість робіт по темі

Найменування робіт по темі дослідження	Трудомісткість за виконавцями, людино-днів					
	Провідний науковий співробітник	Старший науковий співробітник	Молодший науковий співробітник	Інженер-дослідник	Технік	Лаборант
1	2	3	4	5	6	7
1. Уточнення та конкретизація завдань по темі дослідження	-	2	—	2	-	—
2. Аналіз науково-технічних публікацій з теми	2	2	5	-	-	—
3. Компонування звіту	-	2	-	-	-	-
4. План експерименту		2	1	-	1	-
5. Підготовка до експерименту	2	3	3	3	1	3
6.Проведення експериментальної частини	-	-	3	3	1	3
7. Виготовлення зразків	-	-	-	-	-	3
8.Аналізування зразків	2	2	-	2	-	-
9.Висновки по результатам	5	4	1	-	-	-
Разом за виконавцями теми	11	17	13	10	3	9

Таблиця 5.2 – Розрахунок витрат на оплату праці

Посада виконавців теми	Планова трудомісткість, люд-днів	Заробітна плата, грн		
		Посадовий місячний оклад	Середньоденна зарплата	Усього за виконавцями
1.Провідний науковий співробітник	11	12 828	605,09	6 655,99
2.Старший науковий співробітник	17	12 052	568,49	9 664,33
3.Молодший науковий співробітник	13	9912	354	4602
4. Інженер-дослідник	10	6 096	287,55	2 875,5
5.Технік	3	4776	170	510
6. Лаборант	9	4 110	193,87	1 744,83
Разом оплата праці з теми				26052,65

**Єдиний соціальний внесок.**

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ) – це обов’язкове відрахування на загальнодержавне соціальне страхування. З 1 січня 2016 р. ставка ЄСВ складає 22 %. Базою для нарахування ЄСВ слугують загальні витрати на оплату праці по темі (підсумок по табл.1.2).

$$\text{ЄСВ} = \text{ЗП} \cdot 0,22 \quad (5.1)$$

де ЗП – загальні витрати на оплату праці по темі.

$$\text{ЄСВ} = 26052,65 \cdot 0,22 = 5\,731,58 \text{ грн.}$$

### **Матеріали, необхідні для проведення досліджень.**

Для виплавки сталі, в якості шихтових матеріалів використовували сталь Ст08кп, хром металевий Х39А, марганець Мр00, нікель Н-2, алюміній АВ97, мідь М00к, цинк ЦВ00. Застосовували сталевий дріб Алчевського МК [ГОСТ 11964-98; ДСТУ 3184-95].

Як матричного використовували мідні сплави: ливарну латунь, бронзу.

Таблиця 5.3 – Розрахунки витрат на матеріали

Найменування матеріалу	Стандарт, технічні умови	Одиниця виміру	Кількість	Ринкова ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
1. Сталь Ст08кп	ГОСТ 380-94	кг	500	20	10000
2. Хром металевий Х39А	ГОСТ 5905-79	кг	250	318	79500
3. Марганець Мр00	ГОСТ 6008-90	кг	200	90	18000
4. Нікель Н-2	ГОСТ 849-70	кг	150	500	75000
5. Алюміній АВ97	ГОСТ 295-98	кг	200	32	6400
6. Мідь М00к	ГОСТ 546-88	кг	300	270	81000
7. Цинк ЦВ00	ГОСТ 3640-94	кг	200	78	15600
7. Сталевий дріб	ГОСТ 11964-98; ДСТУ 3184-95	кг	400	45	18000

8. Ливарна латунь	ГОСТ 1020-97	кг	350	180	63000
9. Бронзу	ГОСТ 614-97	кг	500	120	60000
Загальні витрати на матеріали					426500

Інші матеріали які використовувалися були в наявності і не було необхідності витрачати кошти на її купівлю.

Транспортно-заготівельні витрати приймаємо на рівні 10 % від планової вартості загальних витрат на матеріали:

$$T_v = 426500 \cdot 0,1 = 42650 \text{ грн.}$$

У такому разі загальна сума витрат на закупівлю матеріалів та їх транспортування буде становити:

$$B_m = 426500 + 42650 = 469150 \text{ грн.}$$

### **Енергоносії для проведення досліджень.**

Витрати на енергію з сторони досліджень було використано для виготовлення шліфів, плавка для реалізації експериментальної частини була виконано підчас лабораторної роботи студентів, тому енергоносії автоматично включаються в плановий кошторис по темі непрямо через статтю «Накладні витрати»

### **Інші прямі неврахована витрати.**

При проведенні роботи інші прямі витрати приймаємо на рівні 10 % від суми врахованих витрати на виконання НДР.

$$I_v = (3П + ЄСВ + B_m) \cdot 0,1; \quad (5.2)$$

Наразі  $I_v$  буде становити:

$$I_v = (26052,65 + 5\,731,58 + 469150) \cdot 0,1 = 50093,4 \text{ грн}$$

### Накладні витрати.

Розглянемо варіант розрахунку накладних витрат пропорційне сумі прямих витрат на рівні 20 %.

$$H_B = (3П + \text{€CB} + B_M + I_B) \cdot 0,2, \quad (5.3)$$

Наразі  $H_B$  буде становити:

$$H_B = (26052,65 + 5\,731,58 + 469150 + 50093,4) \cdot 0,2 = 110205,5 \text{ грн.}$$

### Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми.

Планова калькуляція вартості проведення досліджень по темі складається на підставі виконаних розрахунків та нормативних даних (табл.1.3).

Таблиця 5.4 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1	2	3
1.Витрати на оплату праці	26052,65	Відповідно до розрахунків
2.Єдиний соціальний внесок	5 210,53	22,0 % від загальних витрат на оплату праці
3.Матеріали для проведення досліджень	426500	Відповідно до розрахунків
4.Енергоносії для проведення досліджень	—	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
Продовження таблиці 5.4 : цілей	—	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
6.Вартість послуг сторонніх організацій	—	За договором із сторонніми організаціями (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
7.Витрати на службові відрядження	—	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку не передбачено)
8.Інші невраховані прямі витрати по темі	50093,4	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
9.Накладні витрати	110205,5	Відповідно до нормативів організації-виконавця теми (у нашому випадку 20 % від суми прямих витрат)
10.Усього витрат по темі	618065,1	Сума попередніх статей

### Науково-технічна ефективність НДР.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів.

$$Б = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \quad (5.4)$$

В нашому випадку бальна оцінка ефективності згідно табл. 1.5 становить:

$$Б = 7 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 7 = 225$$

Таблиця 5.5 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умове позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1. Важливість розробки	$K_1$	Робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів	7
2. Можливість використання результатів розробки	$K_2$	Результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі	8
3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки	$K_3$	внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики тощо	6
4. Складність дослідження	$K_4$	робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень	7

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \cdot Б - E_n \cdot B_{\text{НДР}}, \quad (5.5)$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

$E_n$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (може бути в межах 0,1 – 0,3);

$B_{\text{НДР}}$  – сумарні витрати на виконання НДР (підсумок табл. 1.3);

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 2352 - 0,2 \cdot 618065,1 = 1052387 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність НДР визначається коефіцієнтом умовної економічної ефективності  $E_e$ . Він є відношенням умовного ефекту виконання НДР до сумарних витрат на виконання НДР та розраховується за формулою:

$$E_e = \frac{E_{\text{НДР}}}{B_{\text{НДР}}}, \quad (5.6)$$

У нашому прикладі  $E_e$  буде становити:

$$E_e = \frac{1052387}{618065,1} = 1,7$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 1,7 (перевищує одиницю), що свідчить про доцільність її виконання.

## 6 СТАРТАП-ПРОЕКТ

Для України розробка і впровадження нових антифрикційних матеріалів, що складаються з недорогих і недефіцитних компонентів є гостроактуальною ще й з наступних причин: 1) недостатній обсяг розробок і застосування нових нетрадиційних високотносостійких трибоматеріалів; 2) відсутність власних природних родовищ і виробництв ряду кольорових металів, необхідних для отримання стандартних антифрикційних кольорових або легированих сплавів; 3) високі витрати на імпорт трибоматеріалів і запчастин.

Основною метою було розроблення зносостійкого антифрикційного матеріалу з литого композиційного матеріалу системи мідь-сталь. ЛКМ системи мідь-сталь є більш перспективним антифрикційним матеріалом ніж звичайні литі зносостійкі антифрикційні матеріали, в першу чергу своєю дешевизною, збільшеними властивостями у 10 і більше разів.

В дану технологію не потрібно вкладати додаткових коштів, а можна використовувати звичайні печі опору з вкатними подами для виготовлення ЛКМ.

Таблиця 6.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розроблення зносостійкого антифрикційного матеріалу на нові ЛКМ системи мідь - сталь	1. Тяжке машинобудування 2. Легке машинобудування	Впровадження нового зносостійкого антифрикційного матеріалу який є дешевше і має кращі властивості

Від існуючих аналогів дана технологія, перш за все, відрізняються меншою ціною, більшою ефективністю, процес виготовлення матеріалу не потребує нового обладнання.



**Сегмент споживачів.**

Споживачами запропонованого продукту можуть бути наступні промислові підприємства:

- Виробнича компанія «Українські Хімічні Технології ЛТД»;
- ВАТ «Іллічівський рудоремонтний завод»;
- АТ «Ельворті»;
- Імпексгруп Україна
- ООО «Промліт»

**Канали збуту.**

Використовуються канали для прямого впровадження технології. Контакт з покупцем відбувається за допомогою візиту, або онлайн-конференції, через які безпосередньо презентується нова технологія. Також можливе впровадження через виставкові заходи, конференції та за допомогою інтернет-ресурсів.

**Взаємодія з споживачами.**

Взаємодія із споживачами може відбуватися через електронну пошту, по телефону, через соціальні мережі та особисті канали.

Взаємодія із потенційними споживачами – через інтернет-ресурси: сайт проекту, сторінки у соціальних мережах, конференції та виставки.

**Ключові партнери.**

Ключовими партнерами є:

- підприємства, які випробовують і впроваджують нову технологію ;
- компанії з наданням послуг логістики та перевезень;
- постачальники сировини та енергоресурсів для виробництва.

**Витрати.**

Витрати на виробництво будуть мінімальні якщо на підприємстві є

необхідне обладнання. Витрати на ресурсозабезпечення, маркетинг, підтримку інтернет-ресурсів.

### **Споживчі властивості продукту.**

Дана технологія дозволяє зменшити затрати на виробництво виготовлення деталей, які матимуть вищі характеристики.

### **Дослідження ринку.**

Маючи результати аналізу існуючого ринку продукції аналогічних матеріалів можна зробити висновок, що виготовлення деталей за новою технологією, які використовуються сьогодні для виробництва виробів аналогічного призначення можуть програвати за грошовим еквівалентом, швидкістю процесу, складністю виготовлення тобто мати меншу продуктивність, та більші витрати.

### **Опис бізнес-проекту.**

Мета проекту – отримання прибутку шляхом продажу технології отримання зносостійкого атифрикційного литого композитного матеріалу, виготовлення продукції за розробленою технологією.

Актуальність проекту – створення конкуренто спроможної технології виготовлення деталей, яка дасть змогу зменшити затрати на виготовлення її в галузях виробництва.

### **Опис товару/послуги/технології.**

Запропоновану технологію отримання зносостійкого атифрикційного литого композитного матеріалу можна використовувати для виготовлення, щік та молотків дробарок, ножів (лез) грейферів, мелючих тіл, бронефутерувальних плит, млинів, шківів, блоків транспортних систем.

## **Маркетинг та продаж.**

Цільовий сегмент – технології отримання зносостійкого антифрикційного литого композитного матеріалу. Підприємства виробництва всіх напрямків.

Маркетингова стратегія просування проекту на початкових етапах включає в себе:

- просування проекту в мережі Internet;
- участь у галузевих виставках та конференціях;
- проведення презентацій для потенційних покупців.

Для продажу застосовуються прямі канали збуту:

- безпосередній контакт з потенційними покупцями;
- збут через інтернет-ресурси.

## **Фінансовий план.**

На поточному етапі існування проекту фінансовий план у необхідному обсязі не прораховувався.

Однак, розраховано, що заплановані інвестиції для впровадження у виробництво та виробництва готових виробів в межах одного підприємства-виробника становлять:

- оренда промислової потужності: 5 000 \$
- відпрацювання технології в умовах виробництва: 500 \$
- ресурсозабезпечення: 1500 \$
- затрати на логістику, маркетинг, з/п: 5 000 \$

Поточна ситуація по проекту:

- проект на стадії відпрацювання та удосконалення технології в лабораторних умовах;
- в наявності є дослідні зразки;
- певні залежності.

**Резюме.**

Проект призначений для виготовлення виробу у простий спосіб з найменшими затратам.

Заплановані інвестиції для впровадження у виробництво на одному підприємстві становлять 13 000\$.

Основні партнери	Основні заходи	Цінова пропозиція	Відносини з клієнтами	Сегмент клієнтів
<ul style="list-style-type: none"> <li>– підприємства, які випробовують і впроваджують нову технологію;</li> <li>– компанії з націленим постлуг логістики та перевезень;</li> <li>– постачальники сировини та енергоресурсів для виробництва.</li> </ul>	<p>Наукова діяльність</p> <p>Виробництво</p> <p>Маркетинг</p>	<p>Здешевлення продукції шляхом виготовлення зносостійких антифрикційних ЛКМ</p>	<p>Взаємодія із споживачами може відбуватися через електронну пошту, по телефону, через соціальні мережі та особисті канали.</p> <p>Взаємодія із потенційними споживачами – через інтернет-ресурси: сайт проекту, сторінки у соціальних мережах, конференції та виставки.</p>	<p>-Виробнича компанія «Українські Хімічні Технології ЛІД»;</p> <p>- ВАТ «Львівський рудоремонтний завод»;</p> <p>- АТ «Ельворті»;</p> <p>- Інвестгруп Україна</p> <p>- ООО «Промліт»</p>
	<p>Основні ресурси</p> <p>Матеріальні</p> <p>Інтелектуальні</p>		<p>Використовуються канали для прямого впровадження технології. Контакт з покупцем відбувається за допомогою візиту, або онлайн-конференції, через які безпосередньо презентується нова технологія. Також можливе впровадження через виставкові заходи, конференції та за допомогою інтернет-каналів</p>	
<p>Структура витрат</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- оренда промислової потужності: 5 000 \$</li> <li>- відпрацювання технології в умовах виробництва: 500 \$</li> <li>- ресурсозабезпечення: 1500 \$</li> <li>- затрати на логістику, маркетинг, з/п: 5 000 \$</li> </ul>		<p>Потокові доходи</p> <p>Доступно пропонувати нову технологію</p>		

Рисунок 6.1 – Бізнес модель.

## ВИСНОВКИ

Вперше отримано інформацію про абразивне зношування макрөгетерогенного металокомпозита системи мідь - сталь в залежності від природи, твердості частинок і матеріалу, умов фрикційного контакту та ін. факторів в обсязі сипучої маси абразивних частинок.

Показано особливості та переваги ЛКМ як антифрикційного матеріалу в порівнянні з серійними сплавами, які полягають в істотно (до 10 разів і більше) низькому темпі абразивного зношування.

Застосування показників критичного коефіцієнта твердості і еквівалентної твердості дозволяє прогнозувати рівень абразивостійкості матеріалів при наявності дисперсних абразивів різних типів.

Отримані дані мають важливе практичне значення, тому що цей вид зношування має місце в вузлах тертя і з'єднаннях деталей різних механізмів і машин: інструменти та опори дорожні і будівельні, переробні машини, прес-форми для виробництва цегли та ін. продукції пресуванням, шнекові транспортери, живильники і змішувачі сипучої маси і ін.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Hawk J.A. и др. Abrasive wear faibres// ASM Handbook. Materials Park, CH, ASM International. – 2002 (11), 906-921.
2. Nuchtins I.M. Abrasion in wear and manufacturing processes. Metal. Ital. – 2002 (94), № 2, 17-21.
3. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов. – М: Недра. – 2000.
4. Кочаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Высшая школа. – 1991. С. 200.
5. Сорокин Г.М. // Трение и износ. – 2003. – т 24, №1.- с. 80-84.
6. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
7. Гаркунов Д.Н. Триботехника: - М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
8. Орлов П.И. Основы конструирования. – М: Машиностроение. – 1977. – с. 300.
9. Трение, изнашивание, смазка. Под ред. И.В. Крагельского, - М.: Машиностроение, 1978. – т.1. – 399 с.; т.2 – 357 с.
10. Гуляев А.П. // МиТОМ. – 1998. -№11. – с.32 – 39.
11. Бахарева В.Е. // Вопросы материаловедения, - 2001. - №2(26). – с 58-61.
12. Бахарева В.Е. и др. //Судостроительная промышленность. – 1991. – вып. 17. – с 12-19.
13. Шевеля В.В. и др. //Проблемы трибології. – 2000, №1. – с. 67-72.
14. Дворук В.И. Научные основы повышения абразивной стойкости деталей машин. – К.: КМУГА, 1997. С. 101.
15. Nomura M., //Wear. – 2001 (250-251), №2 1414-1420.
16. Баранов Н.Г. //Порошковая металлургия. – 1988, №9. - 29-38.
17. Федорченко И.М. //Порошковая металлургия. – 1979, (196) №4: 53-65.
18. Терновой Ю.Ф. и др. //Материалы 26–й Международной конференции «КМ в промышленности» УИЦ «Наука, техника, технология», - Ялта, 2006, 361-363.
19. Косторнов А.Г. //Тезисы докладов международной конференции «Современное материаловедение: достижения и проблемы». – Киев, 2005, с. 12-13.
20. Фельдштейн Е.Э. и др. //Трение и износ. – 2005, т 26, №6. – 662-667.
21. Новицкий В.Г. и др. //Трение и износ. – 2005, т 26, №4, 420-427.
22. Затуловский С.С., Затуловский А.С. //Перспективные материалы. – 2005, №1. – 66-72.
23. Кащеев В.Н. //Трение и износ. – 1980, т 1, №3. – 425-435.
24. Афонин В.К. и др. Металлы и сплавы. Справочник. – Санкт-Петербург. – Машиностроение, 2003. – 1089.
25. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия. – 1970.

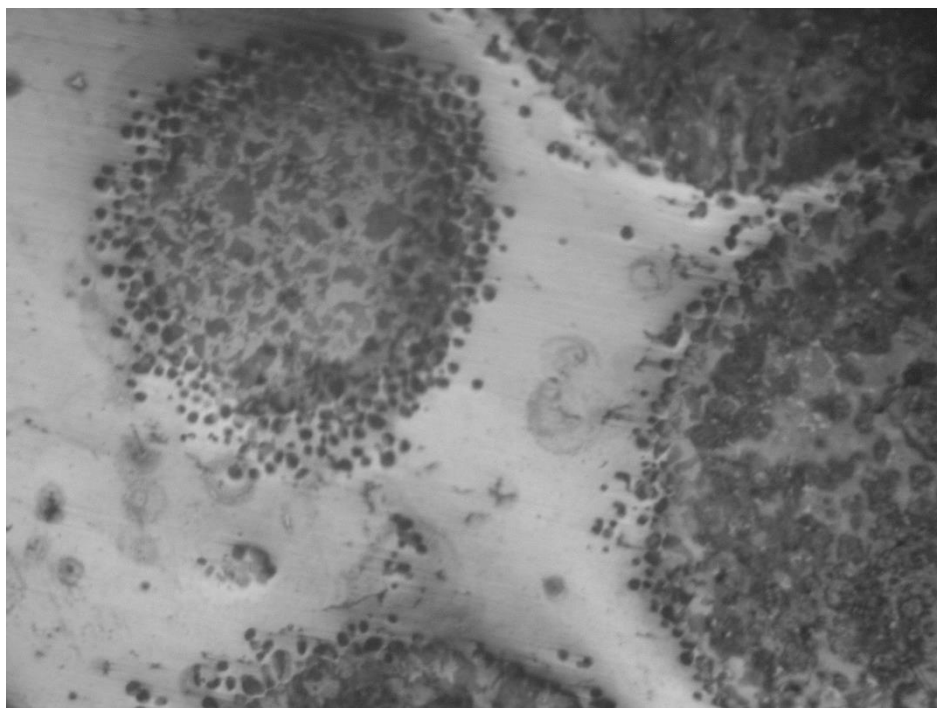
26. Девойно О.Г. и др. Трение и износ. – 2002, т.26 (№6) 675-677.
27. Затуловський С.С. и др. //Металознавство та обробка металів. – 2003. №4. – 33-40.
28. Любченко А.П. Высокопрочные чугуны. – М.: Металлургия, 1982, 180.
29. Горушкина Л.П. Структура и свойства магниевых чугунов. – Харьков. Высшая школа, 1980.
30. Добровольский А.Г., Кошеленко П.И. Абразивная износостойкость металлов. – Киев, Техника, 1989. – 128.
31. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 270.
32. Виноградов В.Н. и др. Абразивное изнашивание бурового инструмента. – М.: Недра, 1980. – 207.
33. Ненахов А.В., Косторнов А.Г. //Порошковая металлургия, 2003, № 7/8, 60-64.
34. Чернышева Т.А. и др. //Перспективные материалы. – 2004. №3. – 69-75; Металлы. – 2001, №6. – 85-98.
35. Дворук В.И. // Проблемы трения и изнашивания. Киев. – Техника – 1992ю – вып. 41. – 8-11.
36. Кашеев В.Н. //Трение и износ. – 1980. – т.1 - №3. – 425-435.
37. Сорокин Г.М., Малышев В.Н. //Трение и износ. – 2005. – том 26, №4. – с. 598-607.
38. Сорокин В.Г. и др. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
39. Костыря В.Ю., Долженков И. Е. //Металловедение и термическая обработка. – 2001. - №4. – 43-46.
40. Белоусов В.Я., Цитрин Д.И. //Трение и износ. – 1983. – том , №6. – 1038-1045.
41. Тракшинский Б.Р., Затуловский С.С. //Материалы 25-й Международной конференции «КМ в промышленности». – Ялта. – 2005. – с 200-202.
42. Archard J.F. //J. Appl. Phys. – 1953 (24), 981-988.
43. Scandella P. //Mater. Sci. Technol. – 2004 (20), 92-105/
44. Смирягин А.П. и др. Промышленные цветные металлы. М.: Металлургия. – 1974. – 490.
45. Zum Gahr K.H. // Tribol. Int. – 1998 (31), N10, p.587-596.
46. ГОСТ 1020-97 «Латуни литейные в чушках. Технические условия».
47. ГОСТ 614-97 «Бронзы литейные в чушках. Технические условия».
48. ГОСТ 380-94 «Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки».
49. ГОСТ 5905-79 «Хром металлический. Технические условия».
50. ГОСТ 6008-90 «Марганец металлический и марганец азотированный. Технические условия».
51. ГОСТ 849-70 «Никель первичный. Технические условия».



52. ГОСТ 295-98 «Алюминий для раскисления, производства ферросплавов и алюминотермии. Технические условия».
53. ГОСТ 546-88 «Катоды медные. Технические условия».
54. ГОСТ 3640-94 «Цинк. Технические условия».
55. ГОСТ 23178-78 «Флюсы паяльные, высокотемпературные, фторборатно- и боридногалогенидные. Технические условия».
56. ГОСТ 8429-77 «Бура. Технические условия».
57. ГОСТ 18704-78 «Кислота борная. Технические условия».
58. ГОСТ 10157-79 «Аргон газообразный и жидкий. Технические условия».
59. ГОСТ 130-78 «Стекло натриевое жидкое. Технические условия».
60. ГОСТ 23483-79 «Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования».
61. ГОСТ 25.503-80 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие».
62. ГОСТ 9454-78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах». 63. ГОСТ 10243-75 «Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры».
64. ГОСТ 25536-82 «Металлы. Масштаб изображений на фотоснимках при металлографических исследованиях».
65. Ю.М. Лахтин «Металловедение и термическая обработка металлов» М.: Металлургия, 1984. – с. 359.
66. ГОСТ 9012-59 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринелю».
67. ГОСТ 9013-59 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу».
68. 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников».
69. ГОСТ 427-75 «Линейки измерительные металлические. Технические условия».
70. ГОСТ 166-89 «Штангенциркули. Технические условия».
71. ГОСТ 6507-90 «Микрометры. Технические условия».
72. ГОСТ 8074-82 «Микроскопы инструментальные. Типы, основные параметры, размеры. Технические условия».
73. Колесниченко и др. // Технология и организация производства, 1975, №12, с. 61-63.
74. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Гб 2.779.013 ТО, 1980.

75. М.М. Хрущев, М.А. Бабичев Абразивное изнашивание, - М.: Наука, 1970, - 251 с.
76. А.Г. Добровольский, П.И. Кошеленко Абразивная износостойкость материалов, - Киев: Техника, 1989, - 128 с.
77. Питко С., Кравчик С. // Трение и износ. – 1993. – Т.14. - №4. – С. 707-710.
78. А.Р. Kudrin, V.F. Labunets // Вісник НАУ. – 2003. - №2. – С. 1-4.
79. В.Ф. Лоренц // Труды Всес. конференции по трению и износу. – М.: Из-во АН ССР, 1939. – т. 1. – С. 17-21.
80. М.М. Тененбаум Сопротивление абразивному изнашиванию, М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
81. И.Ш. Белинигер Склерометрия, под ред. М.И. Хрущева, - М.: Наука, 1968. – С. 135-141.
82. С.С. Затуловский , А.С. Затуловский // Перспективные материалы. – 2005. - №1. – С. 66-72.
83. Большая советская энциклопедия, Третье изд. М.: Из-во «Советская энциклопедия», 1978.
84. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений. Справочник под ред. Т.Я. Косолаковой. М.: Металлургия, 1980. – 928с.
85. Ефимов А.И., Белорукова Л.П. и др. Спр. Свойства неорганических соединений. Л.: Химия, 1983. – 392с.
86. Шведков Е.Л., Ровинский Д.Я., Зозуля В.Д., Брегун Э.Д. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев: Наукова думка, 1990. – 264 с.
87. Трение, изнашивание и смазка. Справочник в 2-х кн. Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978.
88. Стекло. Справочник под ред. Н.М. Павлушкина. М.: Стройиздат, 1973.
89. Краткий справочник физико-химических величин. Под ред. Равделя А.А. Л.: Химия. – 1983. – 232с.
90. Краткая химическая энциклопедия. М.: Из-во «Советская энциклопедия», 1965.
91. Таблицы физических величин. Справочник под ред. И.К. Кикоина, М.: Атомиздат, 1976. – 1008с.

## Додаток А

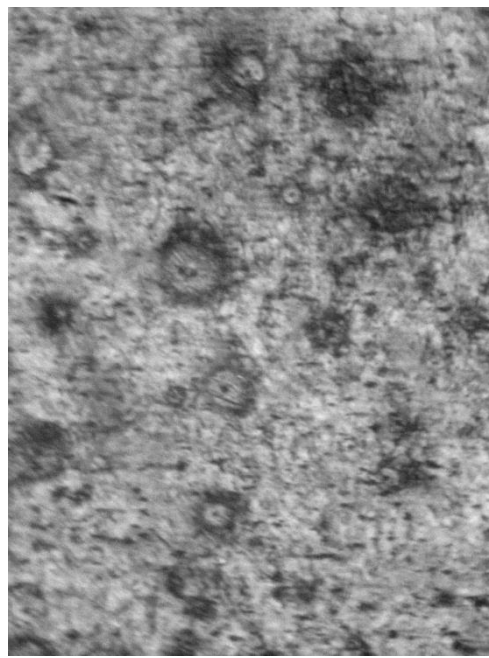


X50

Рисунок 1 – Структура ЛКМ в литому стані.



а



б

Рисунок 2 – Структура армуючих сталєх гранул в литому стані (а) та після гартування ЛКМ (б). X250.

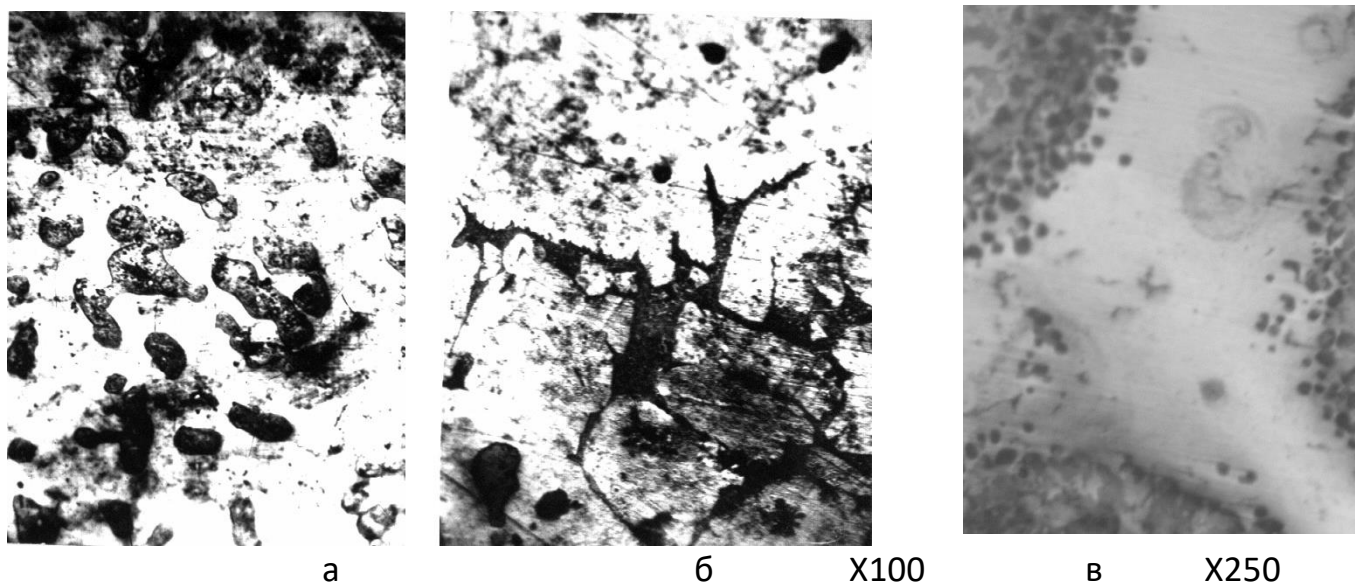
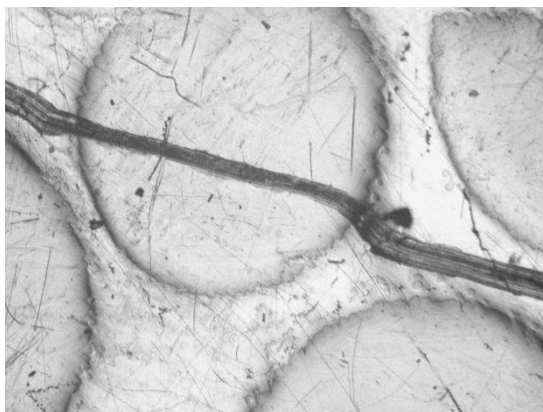


Рисунок 3 - Структура матричного сплаву в початковому стані (а, б) і після просочення насадки зі сталевих гранул при отриманні ЛКМ (в): а - включення залозистої фази; б - евтектоїд  $\alpha_{\text{Cu}} + \gamma_2$  по межах зерен  $\alpha_{\text{Cu}}$  - тв. розчину.

а            x50



б            x50



в            x50

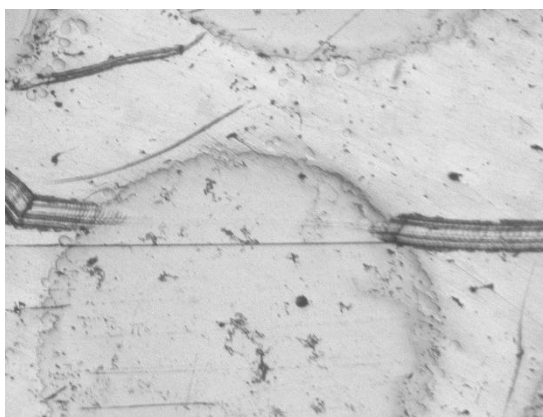


Рисунок 4 - Вид канавок зносу при впливі индентора на поверхню трібоматеріалів: бронзи в початковому стані (а), литого ЛКМ (б); ЛКМ після гарту (в), в умовах склерометричних випробувань при навантаженні 49 г.

## Додаток Б

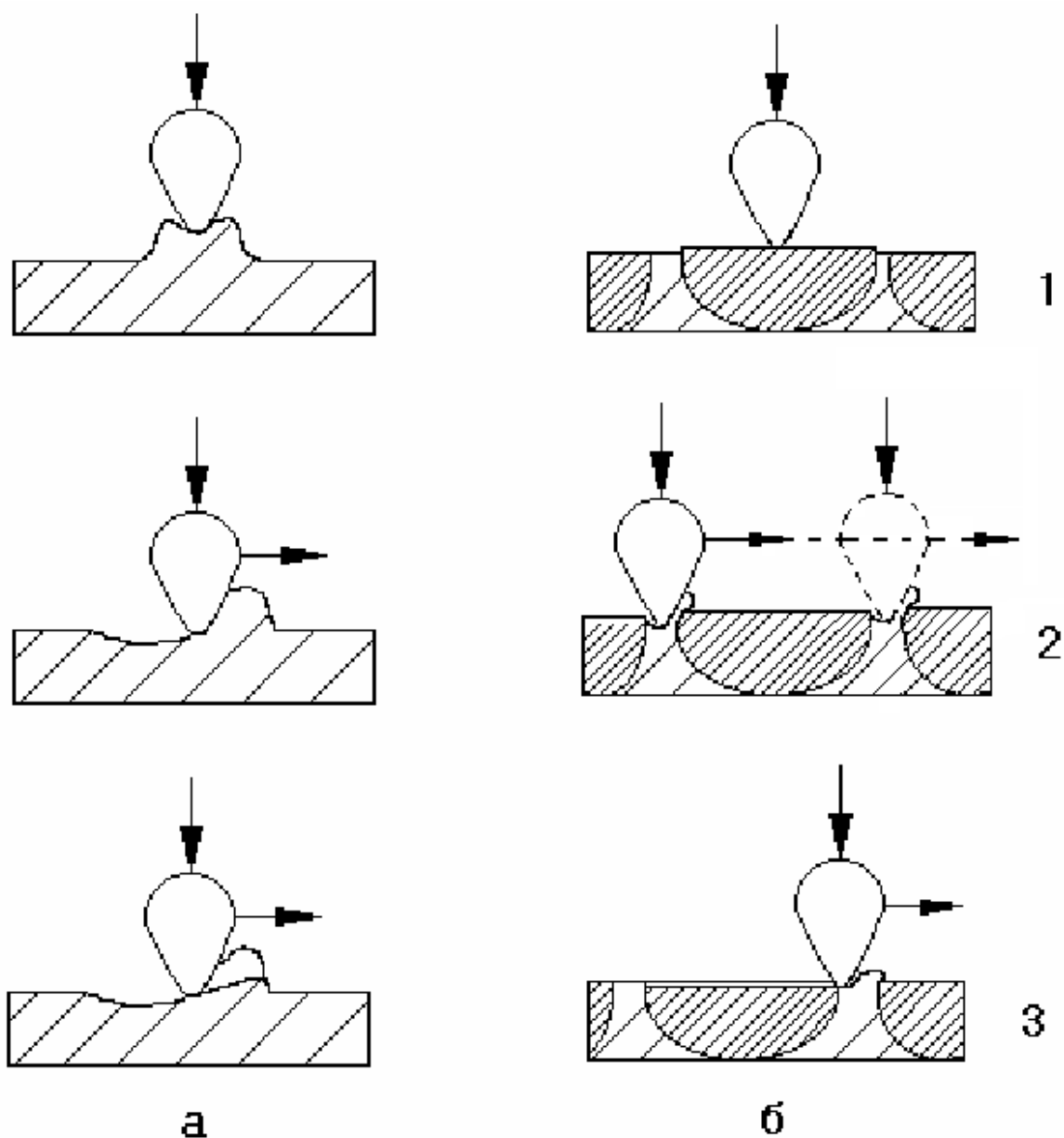


Рисунок 5 - Принципова схема руйнування при абразивному зношуванні а) мономатеріала; б) макростерогенного ЛКМ.

1 - впровадження абразивної частинки;

2 - силове переміщення абразивної частинки;

3 - відділення частинки зносу.

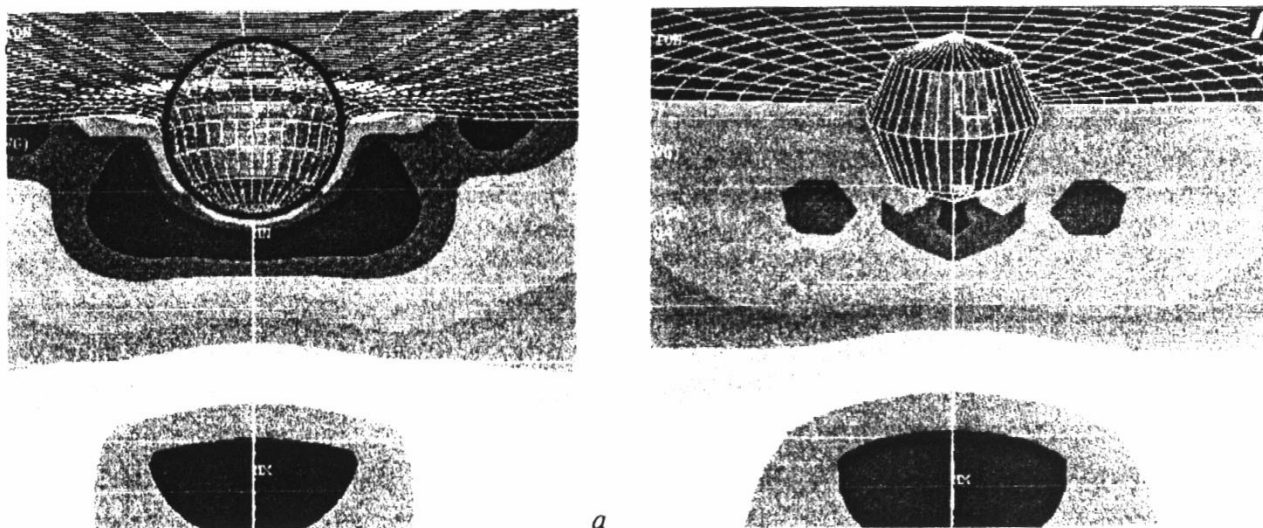


Рисунок 6 - Напружено-деформований стан поверхневого шару втулки при впровадженні в нього абразивної частинки круглої (а) і круглої (б) форми під дією однакової напруги.

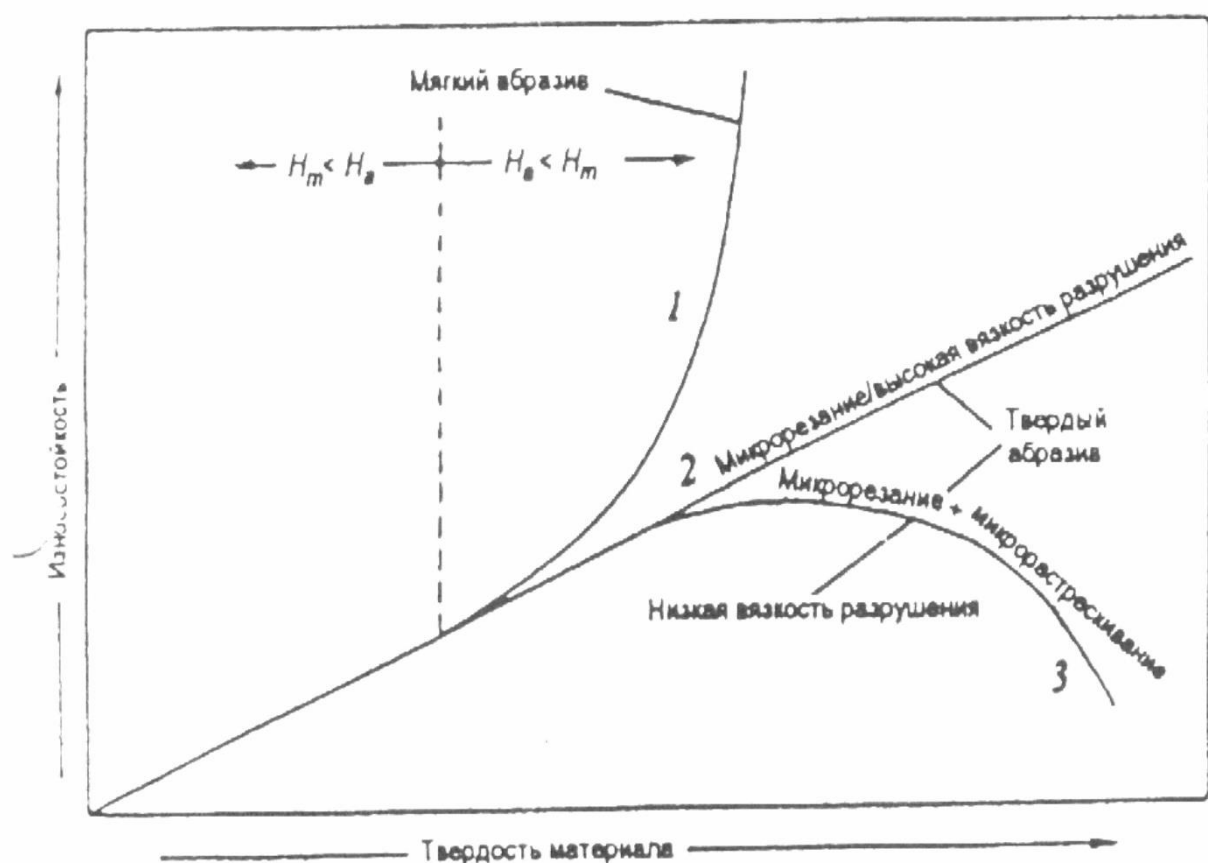


Рисунок 7 - Залежність зносостійкості від твердості матеріалу при використанні м'якого абразиву (1), твердого абразиву, високої в'язкості руйнування матеріалу і переважання механізму мікрорізання (2), твердого абразиву, низькою в'язкості руйнування і переважання мікрорізання і мікроаустрескування (3).



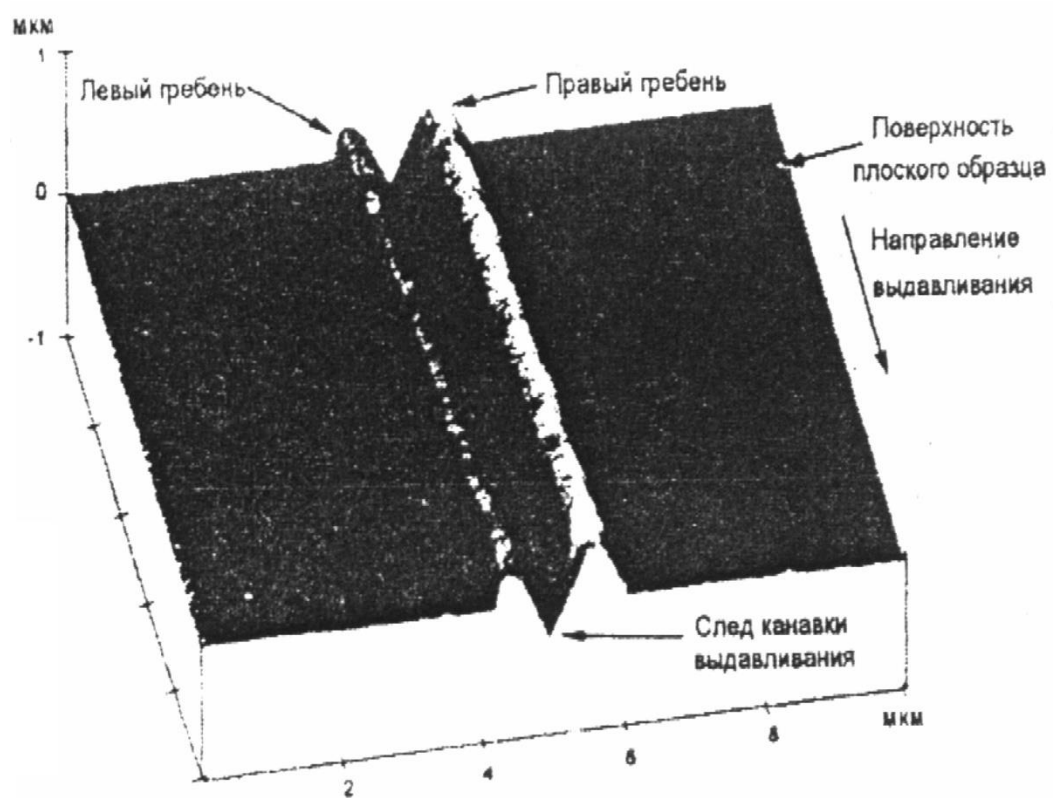


Рисунок 8 – Збільшене зображення канавки зносу.

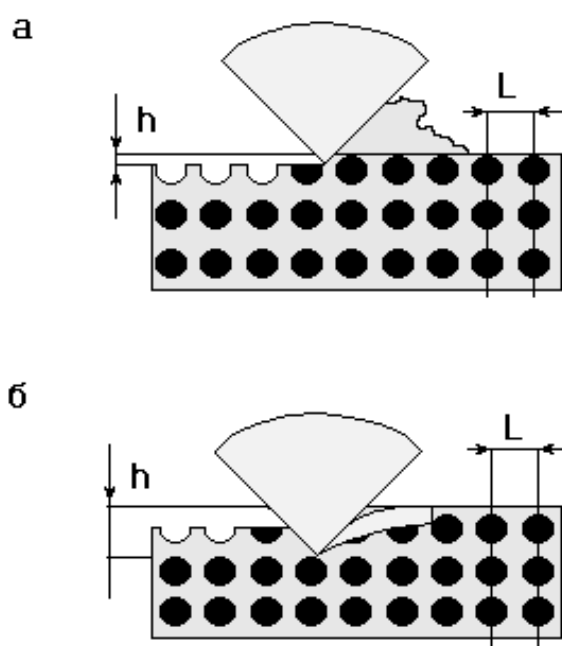


Рисунок 9 - Схематична діаграма абразивного зносу композиту:  $h$  - глибина проникнення частинок;  $L$  - відстань між армуючими частками. а)  $h < L$ ; б)  $h > L$ .

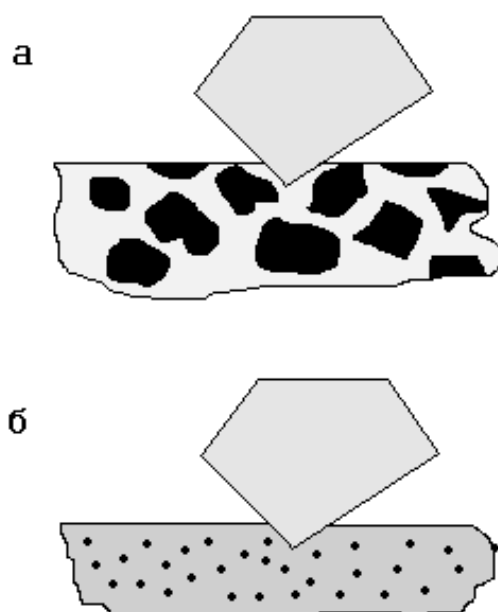


Рисунок 10 - Схема, що ілюструє характер площі контакту: а) композит; б) гомогенний матеріал